LA TEORIA DI RELATIVITÀ

DELL'EINSTEIN

A. Einstein

(Da un disegno di H. Struck, ed. Vieweg).

MANUALI HOEPLI

HARRY SCHMIDT

LA Teoria di Relatività DELL' EINSTEIN

ESPOSIZIONE ELEMENTARE ALLA PORTATA DI TUTTI

Edizione italiana autorizzata
PER CURA DI T. BEMBO E R. CONTU

CON PREFAZIONE DELL'AUTORE E NOTE ILLUSTRATIVE DI R. CONTU

ULRICO HOEPLI
EDITORE-LIBRAIO DELLA REAL CASA
MILANO

1922

COLLEZIONI
D
28
215
BIBLIOTECA CIVICA
BERTOLIANA - VICENZA

PROPRIETÀ RISERVATA

Scuola Tipografica « Figli della Provvidenza » - Milano.

INDICE-SOMMARIO

PREFAZIONE DELL'AUTORE, pag. XI.

AVVERTENZA DEI TRADUTTORI, pag. XIII.

CAPITOLO I: *Lo sviluppo della fisica*, pag. 1.

L'armonia della natura — L'Universo secondo gli antichi e secondo i moderni — Costituzione della materia: da Talete agli scienziati viventi — Le concezioni di Democrito — Spazio e Tempo.

CAPITOLO II: *Le leggi fondamentali della Meccanica generale*, pag. 17.

Il metodo logico della Matematica e le altre Scienze — La Meccanica del Newton e le sue leggi.

CAPITOLO III: *I sistemi di coordinate*, pag. 37.

Determinazione di un punto del piano — Determinazione di un punto dello spazio.

CAPITOLO IV: *Lo spazio assoluto*, pag. 47.

Il compito della Fisica — Il pendolo e l'esperienza del Foucault — Influenza dei movimenti della Terra — Influenza del movimento del Sole — Il punto fermo dell'Universo — Lo spazio in riposo.

CAPITOLO V: *Il principio di Relatività della Meccanica classica*, pag. 57.

Il moto in rapporto alla Prima legge della Dinamica — Il moto in rapporto alla Seconda ed alla Terza legge della

Meccanica — Principio di Relatività della Meccanica classica — Trajettoria di un moto rispetto agli osservatori.

CAPITOLO VI: *L'etere cosmico*, pag. 71.

Trasmissione del suono — Trasmissione della luce — Ipotesi dell'emissione su la natura della luce — Fenomeni di interferenza — Ipotesi delle ondulazioni su la natura della luce — L'etere cosmico.

CAPITOLO VII: *L'esperimento Michelson-Morley* e *la spiegazione di H. A. Lorentz*, pag. 82.

Il principio classico di Relatività — La velocità della luce — L'esperimento Michelson-Morley — La spiegazione di H. A. Lorentz.

CAPITOLO VIII: *Il principio di Relatività particolare di Alberto Einstein*, pag. 96.

Enunciati del principio di Relatività della Meccanica classica — Enunciato provvisorio del principio di Relatività particolare — Enunciato definitivo del principio di Relatività particolare — La propagazione della luce — *Conseguenze della Relatività*: *a*) Simultaneità nel Tempo e dello Spazio — *b*) Relatività del Tempo — *c*) Relatività dello Spazio — I principî fondamentali dell'Einstein — Le formule dell'Einstein — *Altre conseguenze della Relatività*: *a*) Durata del tempo — *b*) Lunghezze — *c*) La invariabilità delle dimensioni nella direzione normale al moto — *d*) Deformazione della figura dei corpi — Una velocità-limite — La ipotesi del Lorentz e la teoria dell'Einstein — Valore del principio di Relatività — Conclusione.

CAPITOLO IX: *Il Mondo tetra-dimensionale*, pag. 125.

Le forme geometriche — Il *continuo* matematico — Un nuovo sistema di coordinate — Geometria euclidea — Geometria non-euclidea — Il sistema di coordinate del Gauss — La concezione di un mondo con una Geometria non-euclidea — Il valore delle Geometrie — Il mondo tetra-dimensionale.

CAPITOLO X: *Il principio di Relatività generale dell'Einstein*, pag. 147.

Generalizzazione del principio di Relatività particolare — La gravitazione — Principio di equivalenza — Enunciato provvisorio del principio di Relatività generale — La Relatività generale nello Spazio e nel Tempo — Forma definitiva del principio di Relatività generale — Confronto tra i due principî di Relatività — Formulazione delle leggi naturali secondo il principio di Relatività generale — La teoria della gravitazione dell'Einstein — Esperimenti cruciali — Contrasti alla Teoria.

CAPITOLO XI: *Il Mondo della Teoria di Relatività*, pag. 168.

Composizione dei movimenti — Le leggi della Meccanica sono soltanto approssimate — Il moto dei pianeti e degli elettroni — La velocità della luce — L'unità della natura — La conservazione della materia — La conservazione dell'energia — Il mondo è illimitato ma non infinito — Lo spazio curvo — Conclusione.

INDICE DEI NOMI, pag. 189.

LA NOSTRA FATICA

È DEDICATA ALLA MEMORIA VIVENTE

DI

IGNAZIO CONTU

I Traduttori

PREFAZIONE DELL'AUTORE

PER L'EDIZIONE ITALIANA

La Teoria di Relatività ha destato in questi ultimi anni un così vasto interesse che il contributo di una sua trattazione — più o meno estesa — non può valere se non quanto il recar civette ad Atene o carbon fossile a Newcastle.

Questa insueta imagine può sembrare non appropriata, tante sono le meraviglie che assomma la potente creazione nel campo del pensiero, dovuta ad Alberto Einstein.

Ma la aristocratica analisi di concetti che compone la Teoria è a paro a paro con le più alte vette della Matematica. Per ciò chi, profano, voglia avere la conoscenza della Teoria, attingendola alle sue fonti, cioè alle opere originali dell'Einstein, deve cozzare contro difficoltà insuperabili.

Lo scopo che questo piccolo libro si prefigge è quello di portare un contributo alla conoscenza della Teoria, che valga per il pubblico dei profani delle scienze matematiche. Per ciò da esso ho bandita di proposito ogni formula. Per ciò ho esposti, prima ancòra che i princìpii della Teoria, nella forma di una facile chiacchierata, quelli fondamentali della Fisica, per rendere i primi meglio comprensibili.

Sento il dovere di ringraziare nel modo più vivo i traduttori italiani.

Possa incontrare anche questa edizione italiana il favore del pubblico e valga essa ad allargare la cerchia dei conoscitori della Teoria di Relatività.

HARRY SCHMIDT

ALTONA SU L'ELBA, *il 27 agosto del 1921.*

AVVERTENZE DEI TRADUTTORI

L'originale tedesco reca il titolo: Das Weltbild der Relativitästheorie — Allgemeinverständliche Einführung in die Einsteinsche Lehre von Raum und Zeit (Il Mondo secondo la Teoria di Relatività — Introduzione elementare allo studio delle teorie einsteiniane su lo Spazio e sul Tempo).

Il suo contenuto è tratto da un corso di conferenze che il dottor Harry Schmidt professò nell'Istituto libero per la cultura di Altona (Freien Bildungswesens der Stadt Altona).

Albert Einstein così ne parla: «Ho letto questo libro, interamente, con sincera ammirazione. L'autore mostra di possedere una grande capacità comunicativa e, insieme, di saper rendere magistralmente lo sviluppo logico del pensiero. Ha rinunziato del tutto alle formule; *ma i concetti sono stati svolti acutamente, sempre, senza mai ricorrere a pigri quanto gratuiti compromessi. Il libro merita di essere divulgato ed io non trascurerò alcuna occasione per raccomandarlo».*

***

La nostra traduzione è fedelissima nella espressione dei concetti e crediamo li renda così come l'originale. Ma è libera nella forma linguistica, e

ciò, non per scarsa conoscenza della lingua dello Schmidt, sì bene per ottenere una forma scorrevole, elegante, italiana. Abbiamo ritenuto opportuno spezzettare i capitoli per comodità del lettore e per suo maggior profitto.

L'originale abbonda di imagini e di citazioni poetiche: le abbiamo conservate perchè il lettore del libro scientifico, come l'ascoltatore delle conferenze, quando non sia un lettore speciale, uno scienziato, più volontieri concede la sua attenzione al libro compostamente adorno di qualche ricamo imaginifico.

Chi nutrito di studi matematici e fisici, voglia affacciarsi a una trattazione rigorosamente scientifica, come ad esempio quella del Lémeray, non perderà il suo tempo leggendo questo manuale: si sentirà, in vece, molto facilitato lo studio, perchè ne avrà una visione chiara e, diremo così, introduttiva.

Non abbiamo usata alcuna parola, propria del linguaggio scientifico, che non possa essere compresa dai lettori che hanno una cultura media; quando non abbiamo potuto evitare l'uso di parole esiliate dal linguaggio comune, le abbiamo chiarite o nel testo o nelle note.

Questa edizione italiana è ricca di note, mentre la tedesca non ne ha alcuna. Sono state compilate ora per chiarire, ora per completare il testo, o con citazioni ed esempi significativi, o con nozioni, acquisite nelle scuole ma dimenticate da quelli che han rivolta la loro attività a tutt'altro campo che non sia quello della Scienza. In talune note vi sono delle formule, ma esse sono semplicissime e il loro richiamo non solo non ostacola la chiarezza della esposizione

ma la migliora sensibilmente; ne abbiamo fatto uso anche quando — come per la formula Lorentz-Einstein — lo Schmidt le ha volute evitare con esplicito proposito, probabilmente per il timore di spaventare quelli che nella matematica vedono sempre la « bestia nera ».

Abbiamo ritenuto opportuno aggiungere per ogni persona citata nel testo o nelle note, l'anno della nascita e della morte, per fissare in qualche modo lo sviluppo storico delle varie concezioni.

La nostra fatica — potrà definirla chi legga anche l'originale — non è stata leggera: ci ha aiutato il proposito di offrire al pubblico italiano un libro che veramente schiuda a tutti, senza molte fatiche, le porte del mistero einsteiniano.

L'Editore ha rivolta ogni sua cura di capace esperienza perchè l'edizione italiana fosse degna di quella tedesca. E vi è riescito.

TOMASO BEMBO
RAFAELE CONTU

Rovigno d'Istria, nell'agosto del 1921.

Capitolo I

LO SVILUPPO DELLA FISICA

L'armonia della natura. — A maggio. Il giorno riarso dal Sole — come quelli che cantano i poeti — tramonta in una atmosfera di sogno. Dietro le case di Störort, che sorgono sur una lingua di terra fra l'Elba e la Stör (*), fin quasi a lambire il margine delle acque, il cielo è un oceano di vampe vermiglie.

Da un lato, confine lontano, l'Elba, sottile linea scintillante; dall'altro, le nubi, danzanti per una ridda di colori; cumuli e cirri fondono le loro forme molteplici, mutevoli da attimo ad attimo.

I colori, selvaggiamente magnifici, dal rosso carico ed il rosa leggero digradano nel giallo sulfureo, nel verde di muschio, nell'azzurro cupo.

D'innanzi a noi: tre edifici, tra folti gruppi d'alberi carichi di foglie, paiono come avvolti in veli di nubi viola; e i prati, immensi tappeti a trapunto floreale, si distendono nel mistero del crepuscolo. Dall'occidente, ecco, la sera tremolante riflette su l'oriente, che ci sta innanzi, verso le chiare altezze, la sinfonia di colori che, delicata imagine di

(*) Affluente nell'estuario dell'Elba.

bellezza, rallegra il nostro occhio. E l'acque della Stör, cullate con un ritmo quasi insensibile, accarezzano il nostro piccolo battello che lentamente risale il fiume.

Quest'ora di tramonto, nella natura libera, è sacra! E gli occhi seguono con nostalgia il giorno, che si accommiata profondendo doni di bellezza. Assorti nei nostri pensieri, guardiamo lo spettacolo magnifico: e l'occhio e il cuore, ricolmi di beata ebbrezza, tremano. Nell'anima, inconsapevole quasi, si infiltra il senso della potente armonia dell'Universo, armonia tra le grandi come tra le piccole cose dell'Infinito.

L'Universo secondo gli antichi e secondo i moderni. — Per l'uomo dei secoli lontani il pianeta su cui vive, una enorme palla di 130 milioni di chilometri quadrati (1), suo incontrastato dominio, è tutto l'Universo.

Poi la Terra è considerata quale un satellite del Sole, come le altre stelle erranti nel cielo — i pianeti — che da tempi lontanissimi attirano l'attenzione speciale degli indagatori. Nicolò Copernico (1473-1543), primo, ci dà tale concezione del sistema solare ed assegna alla Terra, così come agli altri pianeti, una trajettoria propria, circolare, fissa, nel suo moto intorno al Sole, centro del movimento.

---

(1) La superficie della Terra è di 510 milioni di chilometri quadrati (Mariani, *Geologia generale*, ed. Tamburini, Milano).

Su gli albori del secolo XVII, dall'immenso materiale di osservazioni raccolto con somma diligenza da Tycho de Brahe (1546-1601), il suo assistente e, poscia, successore Giovanni Keplero (1571-1630) trae *leggi* precise *per il moto dei pianeti* (2).

Non circoli, si bene ellissi, secondo il Keplero, descrivono i pianeti nel loro moto; il Sole non occupa il centro dell'ellisse, ma uno dei suoi fuochi; i pianeti non percorrono la loro trajettoria con velocità (3) costante, perchè in vicinanza del

(2) Eccole, nella forma comunemente nota:

1.° I pianeti descrivono delle ellissi, un fuoco delle quali è occupato dal Sole (1609).

2.° Le aree descritte dal raggio vettore dal Sole ad un altro pianeta sono proporzionali ai tempi impiegati per descriverle (1609).

3.° I quadrati dei tempi che i varî pianeti impiegano a percorrere le loro trajettorie sono proporzionali ai cubi dei grandi assi delle trajettorie stesse (1618).

Tali leggi non sono rigorosamente esatte, se bene moltissimo approssimate.

Imaginiamo di tagliare un cono con un coltello, tenendo la lama non parallela alla base del cono stesso: le figure che ne risultano, messe, diremo così, a nudo dal taglio, nella porzione superiore e in quella inferiore del cono, sono due *ellissi* (vedi figura 1, nella pagina seguente).

AB e *CD* si chiamano rispettivamente *asse maggiore* ed *asse minore*, F ed F' *fuochi*, punti caratteristici dell'ellisse, i quali godono di una importante proprietà ottica ed acustica: se un raggio luminoso (od un suono) viene inviato da *F* sul contorno, esso viene riflesso in *F'*, e viceversa. — Da ciò, appunto, il nome di fuochi.

(3) Per *velocità* si intende lo spazio percorso in una unità di tempo che, in Fisica, è, di consueto, il minuto secondo, nella vita comune, l'ora.

Sole corron più rapidamente e la variazione di velocità è del tutto caratteristica.

Imaginiamo che un pianeta qualsiasi, ad esempio la Terra, sia congiunto al Sole con una fune perfettamente tesa. Questa si muove anch'essa,

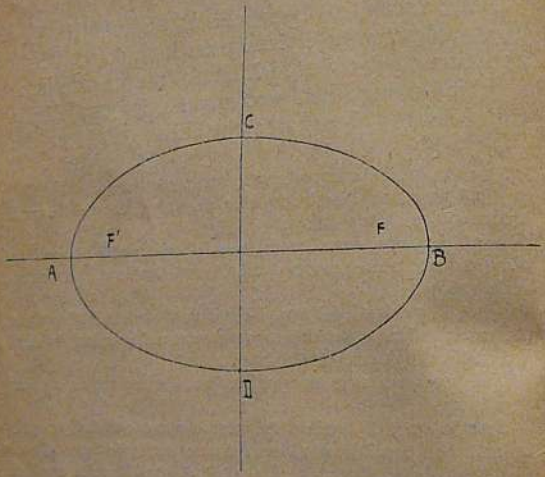

Fig. 1.

quando la Terra si muove, e genera una superficie.

Di questa: la lunghezza è la distanza costante della Terra dal Sole, il contorno è il cammino percorso dalla Terra, l'area, essendo fissata la larghezza, dipende dalla trajettoria.

Il movimento di ogni singolo pianeta, inoltre, è così regolato dalla natura che, scelta, per con-

giungere il Sole con un punto qualsiasi della rispettiva trajettoria, una data fune tesa, questa, in uguali intervalli di tempo, genera porzioni di superficie di uguale area.

Ciò premesso, appare chiaramente come di due pianeti, che distino diversamente dal Sole, quello più vicino corra più rapidamente che non l'altro. Infatti, entrambi, in uno stesso intervallo di tempo, devono descrivere aree eguali; quello più vicino genera una superficie che ha una larghezza inferiore alla larghezza generata dall'altro più lontano e, necessariamente, dovrà percorrere una porzione del contorno più lunga di quella che percorre l'altro pianeta, cioè, la sua velocità deve essere maggiore.

Le leggi del Keplero sono completate da un'altra che pone in relazione i tempi impiegati nella rivoluzione dei varî pianeti con la distanza media di questi dal Sole.

A chi senta parlare per la prima volta delle leggi costanti che abbiamo chiaramente espresse, vien fatto di ricercare le cause che le hanno determinate, di pensarle molteplici, le une diverse dalle altre.

Il merito non dimenticabile di aver formulata una legge fondamentale di cui le altre sono conseguenze inderogabili, spetta al geniale fisico inglese Isacco Newton (1642-1727). Essa è la *legge dell'attrazione universale* che ci dice come tutti i corpi si attraggano reciprocamente con una forza, la cui grandezza dipende dal valore delle

masse dei corpi attratti e dalla distanza che corre tra essi. Quanto maggiori sono le masse tanto maggiore è l'attrazione, quanto maggiore è la distanza tanto minore diventa l'attrazione stessa (4).

Questa semplice legge vale per tutti i corpi; per ciò essa diventa legge dell'Universo.

Essa assegna ai pianeti rotanti intorno al Sole, trajettorie ellittiche come quelle di tutti i corpi celesti, satelliti di altri pianeti, fissa la trajettoria delle comete, — le allegre passeggiatrici del cielo — è, infine, guida sicura per gli astronomi che ricerchino le stelle fisse, scrutando il cielo al cannocchiale.

Il peso è un caso particolare dell'attrazione universale: un sasso cade perchè attratto dal centro della Terra.

Enrico Cavendish (1731-1810) nel 1798, con la sua nota esperienza (5), a mezzo della torsione di un filo metallico, misura l'attrazione che si esercita fra due masse pesanti, convalidando così la legge del Newton, la cui enunciazione diventa un avvenimento scientifico di primaria importanza e consacra alla immortalità, nella storia della cultura, il nome del genio che la ha concepita.

---

(4) Se con m ed m' si indicano due masse, con r la distanza reciproca, con k una costante, che dipende dalle unità di misura scelte per le masse e le lunghezze, la forza d'attrazione è data da

$$F = k \frac{m\,m'}{r^2}$$

(5) Per la descrizione della esperienza vedi: O. Murani, *Trattato elementare di Fisica*, vol. I, 6ª ediz., ed. Hoepli, a pagina 251.

Guardiamo là giù, come il disco enorme del Sole si affretta a tuffarsi sotto l'orizzonte: i raggi del commiato inondano tutta la campagna. Tornano alla memoria i ricordi della mitologia greca: Elio, dio del Sole, nato da Iperione e da Teja, alla fine della sua corsa giornaliera, si immerge nell'Oceano, sul cocchio dorato; l'Aurora, dalle rosee dita, dea del Mattino e del Crepuscolo, incede, vestita di giallo e di rosso, portatrice della fiaccola vampante. A noi, uomini moderni, la scienza vieta di seguire le concezioni poetiche della Mitologia; pure anche noi ci sentiamo potentemente avvinti dalle meraviglie che essa ci palesa e ci vengono a proposito su le labbra le parole di Faust:

Ora il Sole concede il suo regno alla Notte; il Giorno — l'abbiamo tutto vissuto — si affretta a sparire. E domani la Notte cederà il suo regno al Sole.

La Terra, appartenente al sistema solare, è immersa nello spazio che si estende senza confini. Allora che il crepuscolo si spegne e la notte si annunzia, su la volta scura dei cieli scintilla la schiera innumere delle stelle. Lo si deve alla loro luce — messaggera tra noi e lontananze ignote — se si han notizie di miliaia e miliaia di mondi e di soli splendenti che, come il nostro, hanno a torno corone di pianeti.

Cento cinquanta milioni di chilometri (6) sepa-

(6) La distanza media dalla Terra al Sole è di 149.501.000 chilometri.

rano la Terra dal Sole, cioè 3750 volte circa la circonferenza equatoriale (7) della Terra. Numeri di giganti. Ma che cosa mai diventano, se si considera che la luce ha una velocità di 300.000 chilometri al secondo, se si pensa che la luce delle stelle fisse impiega talvolta, per giungere insino a noi, decine d'anni e, financo, secoli? (8) Un raggio di luce inviato dalla stella più vicina giunge a noi dopo quattro anni! Quattro lunghi anni interi, ciascuno di più che 31 milioni di secondi!

Così la Terra non è se non un grano di polvere perduto nell'Universo, la cui grandezza — e non è la sola — veramente ci spaurisce.

Costituzione della materia: da Talete agli scienziati viventi. Come insegna la Chimica, il complesso della materia che ci circonda è costituito con sole poche sostanze fondamentali, gli *elementi chimici:* ben sappiamo a traverso quali stadî si sia giunti a tal concetto (9).

---

(7) Il raggio equatoriale della Terra è di metri 6.377.397, la circonferenza equatoriale di 40.070.368 metri.

(8) Nel 1572 Tycho de Brahe scoprì una stella nuova la cui luce doveva aver impiegato non meno di dugento anni per giungere alla Terra (H. Poincaré, *La valeur de la Science*, Ed. Flammarion).

V'è delle distanze sorprendenti, nella natura.

Gli *ammassi stellari aperti* distano da noi 55 mila anni-luce (tante volte 300000 chilometri quanti sono i minuti secondi contenuti in un anno, rappresentano un anno-luce); gli *sferici* distano da 23 mila anni-luce, il più vicino (*Omega*) a 200 mila, il più lontano; la *nebbia Andromeda*, 600 mila anni-luce, cioè più che tre sestilioni di chilometri.

(9) Vedi: Rinaldo Pitoni, *Storia della Fisica*, S. T. E. N.,

Talete di Mileto (650-540 a. C.) ci dice che l'acqua è una «sostanza fondamentale» principio di ogni cosa. Empedocle da Girgenti (480-420 a. C.) considera altri tre elementi, *aria, terra, fuoco*, come fondamentali nella costituzione di tutte le sostanze; la sua concezione è portata ad insperate altezze da Aristotile di Stagira (384-322 a. C.) (10): lo Schiller la canta e marchia i quattro elementi, per la terribilità con la quale essi si accaniscono contro le opere dell'uomo.

Gli alchimisti dell'Evo Medio vogliono che lo zolfo e il mercurio siano i componenti di tutti i metalli (11).

A mano a mano che la Chimica si allontana dall'empirismo, per salire all'importanza di scienza esatta, giungiamo alla concezione che tutte le sostanze non sono se non composti, svariatamente diversi, di elementi chimici, indivisibili, intrasformabili.

Antonio Lorenzo Lavoisier (1743-1794)

Torino, e E. Mayer e Giua, *Storia della Chimica*, Hoepli. — Il numero degli elementi chimici conosciuti si aggira intorno agli ottanta.

(10) Aristotile introduce anche un quinto elemento, l'*ουσια*, simile all'*etere* dei fisici moderni, quinta essenza di natura eterea, spirituale, esistente da per tutto.

(11) «Tutti i metalli constano di mercurio e di zolfo: a questi, per ottenere le diverse qualità di metalli esistenti, si può aggiungere ciò che loro manca o togliere ciò che contengono in eccesso, ricorrendo alla calcinazione, alla sublimazione, alla decantazione, alla soluzione, alla distillazione, alla coagulazione (cristallizzazione), alla fissazione (*Storia della Chimica*, citata).

nel suo libro classico della Chimica (12), pubblicato nell'anno della rivoluzione francese, il 1789, così scrive: «Ci si stupirà, forse, di non trovare, in questa opera elementare della Chimica, nessun capitolo che tratti delle parti componenti originali e degli elementi dei corpi: ma devo osservare che la teoria, secondo la quale tutti i corpi della natura sono composizioni di due o tre elementi, deriva da un pregiudizio, le cui origini risalgono alla filosofia greca. La supposizione che con quattro elementi, combinati svariatamente, possan formarsi tutti i corpi conosciuti è una gratuita ipotesi. Se però con la espressione *elemento* o *sostanza fondamentale* dei corpi ci riferiamo al concetto dell'estremo limite raggiunto dall'analisi chimica, allora tutte le sostanze che non possiamo in alcun modo scindere diventano per noi elementi.... Essi sono per noi *corpi semplici* e non dobbiamo considerarli quali composti se non quando le esperimentazioni, le osservazioni, ce ne diano una prova».

Le indagini del secolo XIX si mantengono su questo concetto degli elementi chimici, integrato da Giovanni Dalton (1766-1844) nella sua teoria atomica. Secondo la quale una data massa di un elemento non può essere suddivisa indefinitamente, così come da un mucchio di monete uguali si possono separare molti mucchietti, piccoli quanto si voglia, ma non mai più piccoli di una singola moneta. Così anche per la materia:

---

(12) *Traité élémentaire de chimie* (présenté dans un ordre nouveau et d'après les découvertes modernes).

una divisione continuata conduce a particelle di sostanza molto piccole, alle quali si dà il nome di *atomi*.

Gli atomi di un determinato elemento sono tutti uguali fra loro, sia per il peso, sia per la qualità; all'incontro elementi diversi hanno atomi diversi, così come gli aggregati di atomi, ovvero sia i corpi, sono diversi: e nella forma e nel peso.

Il peso vero, diremo così, assoluto, dei singoli atomi non può essere senz'altro calcolato; ma la Chimica ci insegna in vece a calcolare i rapporti di peso tra i varî atomi (13).

L'esempio delle monete può apparirci ricco di risorse, per fissare altre particolarità, su la costituzione della materia, quando si pensi bene che:

non possono ottenersi mucchietti di monete più piccoli di una singola moneta;

ogni moneta può materialmente dividersi, senza difficoltà, in parti molto più piccole.

Per la materia abbiamo che:

non si possono ottenere, agendo *chimicamente* sur un corpo, particelle più piccole degli atomi;

un atomo può suddividersi in parti più piccole.

Ma, nessuna parte di atomo conserva le qualità che ha l'intero atomo, così come un pezzo di moneta non è più una moneta, una sedia senza una gamba non è più una sedia. In conclusione: *gli atomi sono le più piccole parti che conservano le proprietà della materia che essi costituiscono.* Una parte più piccola non le conserva più.

---

(13) I pesi atomici di tutti gli elementi sono riferiti a quello dell'idrogeno, supposto uguale all'unità.

Le recenti indagini hanno condotto ad ammettere che gli atomi possano essere scissi in parti più semplici, ciascuna sempre la stessa per tutti gli atomi conosciuti: cariche elettriche negative, gli *elettroni*, e piccolissime parti di materia recanti una carica positiva. Non solo: ogni singolo atomo costituisce un insieme che rassomiglia ad un sistema solare.

Il centro è un *nocciolo* di materia, carica di elettricità positiva; gli elettroni corrono incessantemente intorno ad esso, in linee chiuse. Ogni elettrone è mille bilioni di volte più piccolo dell'atomo più piccolo che noi conosciamo, il nocciolo mille milioni più piccolo di ciascun elettrone. In tal modo il meraviglioso quadro astronomico nel quale si agita la vita nel regno dei corpi celesti, si riproduce nel mondo degli atomi, ben s'intende in una proporzione infinitamente più piccola.

E v'è per anco la possibilità di pensare che la corrispondenza così tracciata non sia soltanto esterna: il Sommerfeld applicò le leggi del Keplero al moto degli elettroni dell'atomo di idrogeno e i fatti constatati con l'esperimentazione fisica coincidono esattamente con quelli che egli previde nella conclusione dei suoi calcoli matematici.

Ma non sono soltanto queste le meraviglie del mondo atomico, chè nuove indagini ci hanno indotto a ritenere che quel nocciolo microscopico (una frazione di elettrone) possieda una struttura complicatissima, che esso sia costituito da una sfera carica di elettricità negativa nel cui interno

si muovano particule cariche positivamente. L'insieme delle cariche positive è più numeroso dell'insieme delle cariche negative, che per ciò son tutte neutralizzate. Il che spiega perchè il nocciolo si manifesti all'esterno come elettricamente positivo.

Così l'atomo dei chimici sarebbe un nulla perduto nel tutto del sistema stellare, un sistema solare, un duplice sistema: quello nel quale il nocciolo positivo è il Sole e gli elettroni sono i fedeli satelliti e l'altro del nocciolo stesso, nel quale gli elettroni positivi si muovono, secondo leggi fisse, come le stelle nell'Universo; in queste leggi si assommano i due infiniti: l'infinitamente grande e l'infinitamente piccolo.

Le concezioni di Democrito. — Son trascorsi venticinque secoli da che Democrito di Abdera (494-404 a. C.) fece stupire i concittadini con le profonde parole dei suoi strani ragionamenti. Questa la loro ardita essenza: *tutta la natura che ci circonda non è se non una illusione dei nostri sensi.*

La diversità di allegri colori, ricca di forme, in vicende di apparizioni che si susseguono senza riposo, ebbe da Democrito il nome di *mondo apparente*, illusione che non può pretendere una vera esistenza, ma che l'ingegno umano può raffigurarsi, poi che gli occhi, le orecchie, il naso, la lingua, così come le mani, dotate del senso tattile, possono sempre agghindarci le impressioni del mondo esterno, di una ingannevole realtà.

In vero, solo gli atomi esistono, piccolissime par-

ticelle di forma e di grandezza diverse, ma tutte perfettamente identiche nella natura della sostanza di che son composte.

Il mondo in cui viviamo è fatto di atomi e questi soltanto ci danno la sensazione dell'intero divenire naturale, la cui realtà è per i profani moneta sonante di buon conio. Per il fatto che gli atomi si muovono in turbinanti vortici, essi danno all'occhio le sensazioni di luce e di colore, all'orecchio le sensazioni di suono e di tono, al naso le sensazioni di odore, alla lingua, quando venga bombardata da quei piccoli corpi invisibili, le sensazioni del gusto.

Così il nostro mondo, ricco di bellezza e fiammeggiante di Sole, non è se non una fredda società monotona di atomi in incessante moto. Il campo dei movimenti è lo spazio vuoto, nel quale tutto pare immerso come in una gigantesca vasca.

Questo il sistema di Democrito il quale, per esso, fu considerato dai concittadini nè più nè meno che un folle.

Ma noi, uomini dei tempi moderni, sappiamo apprezzare meglio il quadro che egli ci diede del mondo nella completa sua grandezza, poi che esso asseconda perfettamente il nostro desiderio di ricondurre tutti gli avvenimenti naturali, nelle loro più remote cause, a fenomeni di movimento.

Per noi, i singoli toni con i quali il divino Beethoven compose la sua «Nona Sinfonia» sono semplicemente vibrazioni di corde e di colonne d'aria; non dubitiamo punto che un mazzo variopinto di

fiori non tragga la sua bellezza colorata se non dai mille ritmi degradanti dei suoi raggi di luce; e crediamo che un corpo caldo ci si palesa tale, soltanto per effetto dello sfrenato intreccio dei moti molecolari che si svolgono nel suo interno.

In somma, anche per noi, un avvenimento è chiarito se sappiamo dedurne le origini da un qualsiasi fenomeno di movimento.

Si è per questo che nello studio della Fisica si dà la precedenza alla trattazione del moto e delle forze che lo producono, cioè alla Meccanica; e siccome la Meccanica si deve al Newton, così il grande esperimentatore e calcolatore deve considerarsi come il fondatore di una Fisica esattamente scientifica.

L'intero divenire del mondo (il corso delle stelle, i fenomeni fisici e chimici, il turbinìo degli atomi e degli elettroni) così come l'abbiamo descritto, brevemente, e diremmo quasi, con volgari tratti, si palesa per ciò come intimamente connesso al movimento.

Spazio e Tempo. — In tale concezione i concetti di spazio e di tempo diventano essenziali parti componenti del nostro quadro del mondo.

Nello spazio son posti atomi e stelle e nel tempo essi compiono i loro svariati movimenti. Dubitare della loro realtà sarebbe come rinunziare ad ogni conoscenza: senza di essi, tutto ciò che è stato sinora indagato dovrebbe piombare nell'assurdo e senza alcuna speranza di trarnelo a salvezza.

L'indagine moderna ci ha condotti alle più me-

ravigliose conclusioni su l'argomento. Oggi non si deve parlare semplicemente di *Spazio* e di *Tempo;* e, per quanto ciò possa financo sembrarci folle, è necessario rifare tutti i nostri studi, fondandoli su i nuovi concetti.

La via che può condurci alla nuova conoscenza non è facile. Ma dobbiamo percorrerla. Pensiamo alle parole di Wolfango Goethe, cantate nel « Divano occidentale-orientale »:

E infino a quando non avrai compresa la incessante vicenda della morte e della rinascita, sarai sempre un torbido ospite sopra la oscura Terra.

Capitolo II

LE LEGGI FONDAMENTALI DELLA MECCANICA GENERALE

Il metodo logico della Matematica e le altre Scienze. — Ciascuno di noi, nelle scuole, ha studiato la Fisica e, di essa, anzi tutto, la Meccanica, che si occupa dei *movimenti* e delle *forze*. Forse a molti il ricordo non sorride e la grande scienza appare ancòra arida e nojosa.

Se i varî esperimenti dell'elettricità piacevano ed interessavano, se la vista del variopinto nastro di colori, disegnato dalla luce del Sole, dispersa da un prisma, rallegrava gli occhi, la Meccanica, con le sue formule, poteva a pena a pena tener desta l'attenzione e anche freddamente, senza entusiasmi, forse perchè la Meccanica è strettamente legata alla Matematica, descritta sempre come un'arte diabolica, di proverbiale cattiveria.

Tuttavia la Matematica gode di un posto privilegiato fra tutte le Scienze le quali, in vero, vorrebbero invidiarglielo. È un posto meritato. In fatti, quale altra Scienza può vantare risultati precisi e sicuri, come quelli della Matematica?

Un glottologo può, in modo persuasivo, esporre una sua opinione su l'origine e la formazione di una parola: può darsi che essa valga più che non

quelle espresse da altri glottologhi. Ma che cosa è mai questa possibilità a petto della incondizionata esattezza che aderisce agli insegnamenti dei matematici? Questi sono così precisi, così chiari e limpidi che niuno, certo, pensa che possano essere erronei.

Rifacciamoci alla loro origine. A tale uopo non è necessario possedere vaste cognizioni matematiche. Posson bastare quelle apprese nelle scuole, cioè:

a) la definizione degli elementi dei quali la scienza deve servirsi nel suo sviluppo, cioè: del punto, della linea, del piano, dello spazio (1);

---

(1) *Punto:* è un ente geometrico senza dimensioni. La traccia di un lapis sottilissimamente appuntito, segnata sur un foglio di carta ne suggerisce l'imagine. In Fisica, per lo studio dei movimenti dei corpi, si suole sostituire ai corpi stessi dei punti nei quali si suppone concentrata la loro materia costitutiva: detti punti si chiamano *punti materiali*.

Linea: è generata da un punto che si muove in una determinata posizione. Ha una sola dimensione: la lunghezza.

Se il punto si muove sempre nella stessa direzione, genera una *retta*. Un filo di seta, sottilissimo, illimitatamente grande, teso completamente, ne suggerisce l'imagine. Le linee si suppongono di lunghezza illimitatamente grande; il *segmento* è una porzione di linea limitata tra due punti.

Piano: è una figura geometrica generata da una retta che si muove parallelamente a se stessa. Ha due dimensioni: lunghezza e larghezza, entrambe illimitate. Un foglio di carta supposto illimitatamente grande ne suggerisce l'imagine.

Spazio: è una figura geometrica generata da un piano che muove parallelamente a se stesso. Ha tre dimensioni: lunghezza, larghezza o profondità, altezza, tutte e tre illimitate. Una stanza le cui pareti, il soffitto, il pavimento si suppongano illimitatamente grandi suggerisce l'imagine dello spazio.

b) i tre principî fondamentali detti *assiomi*:

1.° Per due punti dello spazio passa sempre una retta ed una sola.

2.° La linea retta è la più breve distanza tra due punti dati.

3.° Dati una retta ed un punto, per questo si può far sempre passare una retta parallela alla prima ed una sola.

I tre enunciati non hanno bisogno di una qualsiasi dimostrazione, poi che la loro evidenza è radicata in noi dalla educazione culturale; porli in dubbio sarebbe come rinunciare all'intelligenza. Ritorneremo su l'argomento: intanto qui ci basta d'averlo fissato.

Consideriamo una qualsiasi proposizione della Geometria, ad esempio quella per cui la somma degli angoli di un triangolo è uguale a due angoli retti.

Può essere dimostrata e appare giusta, semplice oltre ogni dire, logica, tale insomma da non destarci alcun dubbio; ma soltanto alla condizione che altri enunciati, che la precedono, sian giusti. Questi, alla lor volta, richiedono la giustezza degli enunciati precedenti, e così via, fino a giungere a quelli più semplici di tutta la Geometria: cioè ai tre che abbiamo citati. In altre parole: con una catena, più o meno lunga di conclusioni, dimostriamo che gli enunciati, posti come verità, sono la necessaria conseguenza di altri enunciati; e poi che la giustezza, diremo meglio, la logicità di questa conseguenza è inoppugnabile, gli enunciati ai quali si giunge devono esser giusti.

Da questa esposizione possiamo farci un'idea dell'importanza che assumono i principî fondamentali della Geometria. Sono basamenti su i quali si innalza l'edificio della Geometria affidando loro la sua sicurezza: se li si scuota, l'edificio gigantesco crolla irrimediabilmente: non vi è scampo a ciò. Ma, per il momento, nessun pericolo li sovrasta; stan «come torre ferma» al di sopra di ogni pìcolo dubbio e l'edificio che sorreggono, superbamente sovrasta le vette più illuminate nel mondo del pensiero umano.

Dopo quanto si è detto non può meravigliare il fatto che anche in altri campi dello scibile umano si sian fatti molteplici tentativi per seguire il metodo di indagine instaurato dalla Matematica, per poter giungere a risultati sicuri.

Ricordiamo ad esempio, il sistema della *Etica* di Baruch Spinoza (1632-1677), sviluppato con metodo quasi esclusivamente matematico. Lo Spinoza definisce da prima i concetti adoperati nella sua trattazione, enunciando alcune proposizioni fondamentali. Queste non possono essere dimostrate, ma non ne hanno né pure bisogno; tutte le altre proposizioni, così come nella Matematica, sono ricondotte ai principî fondamentali, con una catena logica di conclusioni, dette *prove*.

La Meccanica del Newton e le sue leggi. — Ma, fra tutte, la scienza che indubbiamente ha tratti i maggiori vantaggi dal metodo mate-

matico è la Fisica. Il merito d'averlo introdotto in questa scienza spetta al Newton che condusse la Meccanica ad una trattazione rigorosamente matematica, predisponendo il materiale di calcolo di cui tutta la Fisica si doveva poi servire, poi che le più remote cause di ogni fenomeno fisico hanno potuto considerarsi, in sostanza, come legate alla Meccanica. Per farci un'idea, a bastanza esatta, dei principî della Meccanica newtoniana consideriamo un esempio che ci offre la vita quotidiana.

Imaginiamo un viaggiatore che da un carro scoperto, un carro piatto, come quelli adibiti al trasporto dei legnami, di un treno merci in moto, lanci per aria, nella direzione del movimento del treno, una palla di cuojo. Se il viaggiatore voglia riprendere la palla, quando, raggiunta una certa altezza, ricade, dovrà andare innanzi, indietro, o restar fermo?

Poi che il treno si muove, a meno che non abbia la lentezza di una chiocciola, e corre, quindi, innanzi, mentre la palla prima sale e poi discende, vien fatto di rispondere che questa debba cadere sur uno dei carri retrostanti, e che, quindi, il viaggiatore debba, per riprendere la palla, camminare indietro, verso quel carro. Un osservatore, superficiale, che non tenesse conto di tutti gli elementi che entrano in gioco nel fatto considerato, non risponderebbe altrimenti.

Ma, in effetti, anche quando il treno si movesse con una velocità non trascurabile, il viaggiatore

potrebbe riprendere la palla solo restando fermo nel punto da cui l'aveva lanciata. Nulla in ciò di strano; e per convincersi che così avverrebbe — se non intervenissero altre cause indipendenti dal moto del treno e della palla — basti pensare che, quando un bimbo lanci per aria, correndo, la sua palla di gomma, non riceve la palla su le mani protese in alto, se non quando continui a correre innanzi.

Eguale osservazione può farsi da una carrozza trascinata dai cavalli in celere corsa, da un tram elettrico, dal più rapido treno direttissimo.

Di esempi simili a quello del treno merci poc'anzi citato posson trovarsene quanti se ne voglia; ma nella osservazione comune non sono frequenti ed anzi abitudinariamente cadon sotto i nostri occhi fenomeni nei quali tutto pare avvenga in modo del tutto opposto; il che ci fa sembrare strana la risposta giusta che noi abbiamo data, correggendo l'opinione comune.

Se un viaggiatore si trovi in una vettura ferroviaria chiusa, crederà, in certo qual modo, che un oggetto che egli lanci non segua affatto il movimento del treno, e che, come l'aria che non può uscire fuor della vettura tutta chiusa, rimane sempre dentro la vettura stessa, così anche l'oggetto rimanga là, dove è lanciato; e niuno risponderà erratamente come a proposito della palla lanciata dal carro piatto.

Ma, come avviene che sopra il treno merci, tutto si svolga come noi abbiamo detto? Forse che l'aria agisca su la palla come soffio di bufera?

No davvero: le stesse leggi regolano uno stesso avvenimento; e nel nostro caso troveremmo sempre una stessa legge anche quando la palla fosse lanciata a molti metri di altezza. E nulla vi è di strano in ciò: ce ne convinceremo perfettamente.

Riprendiamo i nostri ragionamenti su la palla lanciata dal treno merci. Se essa deve ricadere su le mani del viaggiatore è logico pensare che ad ogni istante si trovi *al di sopra* dell'osservatore stesso, anche quando questo corre in linea retta sul carro, così come avverrebbe se il treno fosse fermo. Il viaggiatore vedrà oscillare la palla su la sua testa: il moto di ascesa avrà una velocità decrescente, quello di discesa una velocità crescente. Ma un osservatore fermo che si ponga, ad esempio, poco in là della massicciata della ferrovia, vedrà la *trajettoria* (2) della palla diversamente poi che per lui la palla è animata da due movimenti, uno di ascesa e di discesa — che osserva anche il viaggiatore in moto — l'altro nella direzione del treno che cammina; all'osservatore fermo la palla *apparirà* ancòra animata di un sol moto, ma con una trajettoria curvilinea, che precisamente ha la forma di una *parabola* (3).

---

(2) La *trajettoria* è la linea che si imagina tracciata da un punto materiale in movimento; la scia luminosa di un razzo ci suggerisce l'imagine di quel che sia una trajettoria.

(3) Possiamo considerare il moto del treno *uniforme* e quello di caduta della palla *uniformemente accelerato* (v. nota 2 pag. 32). I punti su la retta $A : a_1, a_2, a_3$ (vedi figura 2) rappresentano le posizioni del treno, ad esempio dopo un secondo, due secondi,

Di quanto precede può cogliersi l'elemento caratteristico e cioè che: *la palla lanciata dal viaggia-*

tre secondi; i punti su la retta B: b_1, b_2, b_3, rappresentano le

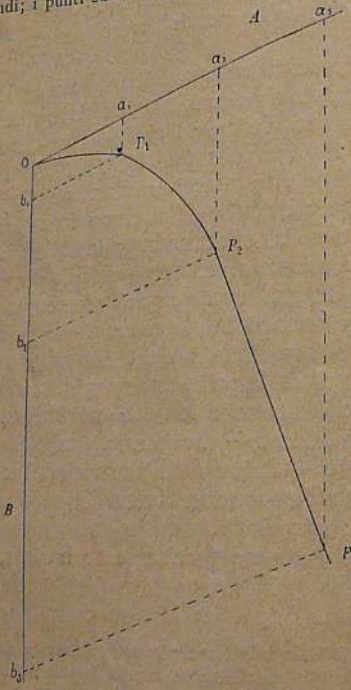

Fig. 2.

posizioni della palla dopo un secondo, due secondi, tre secondi. Devo ritener nota la regola del parallelogramma per la composi-

tore partecipa in ogni caso al moto del treno. Ciò è senz'altro evidente, quando la palla riposi sul vagone, ma se pure non così evidente, non è men vero quando essa se ne distacchi, per effetto del lancio; e di fatti questo non le impedisce di conservare ancòra il moto primitivo.

---

zione di due movimenti (vedi figura 3) ed il *principio della indipendente coesistenza dei movimenti*, dovuto a Galileo; mi limito

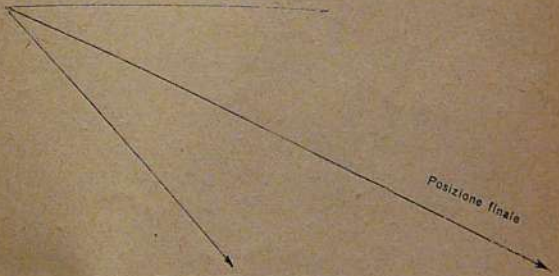

Fig. 3.

ad enunciarli opportunamente combinati: « se un corpo è animato da due moti contemporanei, ed i lati di un angolo rappresentano ciascuno la trajettoria di un moto, se l'angolo è lo stesso che fanno le due trajettorie, dopo un certo tempo il corpo si trova nel punto istesso in cui si troverebbe se i moti fossero, anzi che contemporanei, successivi; costrutto un parallelogramma, che abbia per lati quelli dell'angolo sopradetto, la posizione del punto è determinata dall'estremo della diagonale passante per il vertice dell'angolo considerato ». È chiaro, ciò premesso, come, dopo un secondo la palla debba trovarsi nel punto P_1 dopo due secondi in P_2, dopo tre secondi in P_3. La trajettoria

In tal modo abbiamo completamente precisato il *primo principio della Meccanica* newtoniana (4)

della palla ci sarà data da una linea che passi per detti punti. Se i due moti fossero della stessa specie la linea sarebbe retta; nel nostro caso, in vece, come può dimostrarsi con una serie di semplici considerazioni geometriche, la linea è curva e precisamente è una *parabola*, curva speciale ottenuta come mostra la

Fig. 4.

figura 4; l'osservatore dalla massicciata vede appunto la trajettoria della palla parabolica.

(4) Tal principio, noto sotto il nome di *legge di inerzia*, è la prima legge della Dinamica (parte della Fisica che studia il moto dei corpi nei riguardi delle forze che lo producono e delle masse in azione). La parte fondamentale di essa è dovuta a Leonardo da Vinci (1452-1519). Intravvisto da Giovanni Battista Benedetti (1530-1590) veneto, fu formulato da Galileo Galilei (1564-1642). Il merito grande del Galilei, e se ne vedranno i risultati, consiste nell'aver, primo, distinto nettamente, nel moto dei corpi, ciò che è in-

che così si esprime nella forma scientifica consueta: « Ogni corpo non animato tende a perseverare nello stato di quiete o di moto rettilineo ed uniforme e vi persevera insino a che su di esso non agiscono cause esterne che lo inducano a cambiare lo stato stesso ».

A questo enunciato si è giunti con lavorio di intelletto, suffragato da esperienze acconciamente istituite.

La legge si compone di due parti:

1.ª Ogni corpo, non animato, persevera nel suo stato di quiete, insino a che non intervengano cause esterne che ne lo rimuovano.

2.ª Ogni corpo, non animato, persevera nel suo stato di moto rettilineo ed uniforme, insino a che non intervengano su esso cause esterne che glielo facciano variare.

La prima parte ci dice che se un corpo è fermo esso non può porsi in moto, a meno che su di esso non agisca una causa esterna che lo spinga al moto stesso: la verità dell'asserto è senz'altro evidente e non richiede alcuna dimostrazione.

Un corpo animato, l'uomo, ad esempio, si muove anche senza l'intervento di una causa esterna — sempre però una causa deve intervenire e negli ani-

---

dispensabile, essenziale, da quanto in vece è solamente accessorio, accidentale.

Per chi interessi, noto che una breve ma succosa critica della legge d'inerzia, non su la verità dell'asserto, ma sul suo significato, può trovarsi in : *Il Pragmatismo* di Mario Calderoni e Giuseppe Vailati (ed. Carabba). Vedere anche: Vailati, *Gli strumenti della conoscienza*.

mali essa è, diremo così, interna — ma perchè appunto la proposizione possa conservare il suo carattere di assoluta verità, l'enunciato specifica che la legge stessa si riferisce a corpi *non animati*.

La seconda parte, in vece, non è come la prima, senz'altro evidente. Essa ci dice che un corpo in moto non può mutare nè la sua velocità, nè la sua direzione insino a che non intervengano cause esterne, ovvero sia che il moto di un corpo tende a conservarsi immutato nella velocità, e rettilineo, a seguire cioè una trajettoria rettilinea.

Chiarito così il significato dell'asserto, possiamo affermare senz'altro che la esperienza ce la convalida? No. L'esperienza comune, superficialmente seguìta, ci dice, anzi, che un corpo abbandonato a sè, dopo un tempo più o meno lungo, passa allo stato di quiete. Tutti sappiamo che il pendolo di un orologio da camera non oscilla più se dimentichiamo di caricarlo periodicamente, e che una palla di biliardo non corre tra sponda e sponda indefinitamente, ma si ferma se non le diamo un colpo di stecca al momento opportuno.

È dunque falsa la seconda parte del nostro enunciato? Vedremo che no, ma occorrerà osservare le nostre esperienze con chiari occhi.

La legge vale quando i corpi sian posti fuori dell'influenza di cause esterne. Soltanto se possiamo avere la certezza che negli esempi addotti del pendolo e del biliardo, non agisce alcuna causa esterna, possiamo dire che la seconda parte dell'enunciato è falsa. Ma quella certezza non l'abbiamo. Infatti: sia il pendolo che la palla si muovono nell'aria,

che si oppone al moto; e la palla nello scorrere sul panno, pochissimo scabro, quanto si voglia, ma non perfettamente liscio, e il pendolo, nel rotare intorno al suo punto di sospensione, incontrano una certa resistenza, alla quale si dà il nome di *attrito*.

L'attrito e la *resistenza dell'aria* sono dunque cause esterne che in certo qual modo ostacolano il moto; possono essere piccolissime ma non mai nulle: poi che esse intervengono sempre nelle nostre esperienze, i corpi, il cui moto noi esaminiamo, non possono mai trovarsi nelle condizioni ideali richieste dall'enunciato, indispensabili per provare il valore di verità dell'enunciato stesso. Non per questo, però, dobbiamo senz'altro concludere che l'esperienza e la legge si contraddicono.

Il principio da noi espresso appartiene alla specie di quelli che stanno a base delle Matematiche: se la sua prova è impossibile, se su la Terra è impossibile riprodurre le condizioni caratteristiche che abbiamo chiamate ideali, essenziali, per la verifica del principio stesso, è per anco vero che quanto più nei nostri gabinetti esperimentali riesciamo a diminuire le influenze esterne agenti su i corpi in moto, cioè ad affinare le nostre esperienze, tanto più i corpi si avvicinano alle condizioni ideali che noi poniamo a base della nostra legge, ed il loro moto si avvicina a quello che ha le caratteristiche ideali volute dalla legge stessa. Possiamo per ciò concludere, generalizzando i risultati dell'esperienza, esaminati con chiaro intelletto, che

le cause turbatrici del moto sono accessorie, estranee al moto ideale. Questo è sempre accompagnato da influenze di specie e di forma diverse: bisogna nettamente isolarlo da esse, conservandogli le sole proprietà essenziali. Soltanto a tale condizione la legge potrà aspirare ad entrare nel dominio delle conoscenze esatte, verso il quale ci guida l'osservazione della natura.

I principî della Meccanica e quelli della Geometria presentano molti punti di contatto sì che possono ritenersi simiglianti; ma tra essi vi è anche una sostanziale differenza e cioè che: mentre i principi geometrici riflettono le qualità caratteristiche dello spazio privo di materia, i principî meccanici riflettono le proprietà della materia racchiusa nello spazio.

In altre parole: la Matematica ci appare indissolubilmente collegata alla esistenza dello spazio, la Fisica all'esistenza della materia che, or sotto forma di atomi chimici, or sotto forma di corpi celesti, secondo le nostre cognizioni, riempie tutto lo Spazio. Potremmo concepire l'assenza della materia, non potremmo in vece concepire la non esistenza dello *spazio in sè*, l'*illimitato* che contiene il Mondo. Il metodo indagativo matematico conduce nella Geometria a verità (5) che noi non

(5) Anzi che di « verità », armonizzando il pensiero con quello dell'illustre matematico Enrico Poincaré (1854-1912), dovrebbesi usare altra parola, poi che, nella Geometria non si può parlare di proposizioni più o meno vere, ma di proposizioni più o meno *comode*, cioè più o meno idonee ad una determinata

osiamo, non dico contestare, ma nè pure porre menomamente in dubbio; nella Meccanica, in vece, conduce a risultati tali la cui verità, pur essendo molto probabile, non può essere provata esaurientemente alla luce della esperienza.

E ciò dipende non dal metodo seguito, si bene dal modo di comportarsi dei corpi, da determinate proprietà della materia che fino ad oggi ci erano sconosciute, e delle quali per ciò non tenevamo prima conto nelle nostre indagini.

Con altre parole: i fenomeni naturali non ci si presentano come necessità geometriche, si bene come avvenimenti di carattere materiale, la cui cognizione e la cui comprensione costituiscono la più alta meta della Fisica.

Ma torniamo alla esposizione delle leggi fondamentali della Meccanica. Quella che ci ha occupato sinora ha avuto il nome di *legge di inerzia*, appunto perchè intravvede, insita in tutti i corpi, una certa riluttanza a cambiare di stato.

Ogni qual volta l'esperienza ci sembra contraddica la legge di inerzia, ossia quando vediamo un corpo in quiete mettersi in moto, e un corpo in moto passare improvvisamente allo stato di quiete, o pure, sempre se in moto, mutare la trajettoria, o percorrerla anzi che con velocità

---

trattazione (vedi il *Pragmatismo*, citato; *La science et l'hypothèse*, *La valeur de la science*, par H. Poincaré, éd. Ernest Flammarion).

costante, con velocità variabile, dobbiamo subito pensare all'intervento di una o più cause esterne.

Queste cause, quale che sia la loro natura — non sempre potremo conoscerla (6) — si chiamano *forze*.

Per *forza*, quindi, dovremo intendere una causa alla quale si deve la variazione del moto di un corpo e la sua misura ci sarà data dalla misura della variazione stessa.

Come possono manifestarsi le variazioni del moto di un corpo che segua la legge d'inerzia? L'abbiamo già visto: o con un mutamento della *grandezza della velocità*, per il quale il moto si accelera o ritarda, o pure con un mutamento della sua direzione, mutamento dovuto alla *accelerazione* (7) la cui direzione fa deviare il corpo di un dato angolo, dalla direzione primitiva del movimento.

Quanto maggiore sarà l'accelerazione per un dato corpo, tanto maggiore sarà la forza corrispon-

---

(6) Ad esempio, nulla noi sappiamo su la natura delle forze elettriche, magnetiche, elettromagnetiche: conosciamo soltanto gli effetti che esse producono.

(7) *Accelerazione* è l'aumento o la diminuzione della velocità che un corpo in moto subisce nella unità di tempo, variazione in *grandezza* ed in *direzione*. Questa variazione può essere costante, ad esempio pari ad un metro, in più od in meno, ad ogni secondo e il moto si chiama, rispettivamente, *uniformemente accelerato* o *ritardato*. Ma può anche essere variabile, ad esempio: dopo un secondo pari ad un metro, dopo due secondi pari a cinque metri; in tal caso il moto si chiama *vario*. Se la velocità è sempre costante, il moto si chiama *uniforme*.

dente. Ma bisogna tener conto anche della *massa* (8) del corpo; se noi vorremo imprimere una data accelerazione a due corpi di differente massa, dovremo mettere in gioco due forze di diversa grandezza, maggiore quella per il corpo di massa maggiore, minore quella per il corpo di massa minore. Pensando alle spinte che occorre esercitare sur un masso di ferro e sur una palla di biliardo, si comprende quale relazione passi tra massa e forza. Una forza, quindi, è misurata dalla grandezza della massa, e da quella dell'accelerazione che essa è capace di imprimere; precisamente dal prodotto

$$massa \times accelerazione.$$

In tal modo abbiamo trattato della *seconda legge della Meccanica newtoniana* (9).

(8-9) La II legge della Dinamica, scoperta da Galileo, per il moto dei gravi, fu formulata dal Newton, che l'applicò anche ai fenomeni celesti, trovandola pienamente confermata. Essa si enuncia così: « L'accelerazione che una forza imprime ad un corpo sul quale agisce, è proporzionale alla forza stessa ed è diretta secondo la retta d'azione della forza ».

Se F è una forza costante, m una costante propria del corpo, che vedremo identificabile, in qualche modo, con la massa, a l'accelerazione, avremo $F = m.a$ (*I*) traduzione simbolica di quanto è detto nel testo.

Facciamo ora agire la stessa forza F sur un altro corpo la cui costante sia m' e l'accelerazione che gli imprime a'; avremo $F = m'.a'$.

Cioè $m.a = m'.a'$, equivalente a $\frac{m}{m'} = \frac{a'}{a}$, espressione che, tradotta nel linguaggio comune, ci dice come le due costanti

Nessuna maraviglia se lo si sia fatto brevemente. Faremo uso limitato di essa; quanto è stato detto è più che sufficiente.

Brevi saremo anche per la *terza legge*, di cui parleremo soltanto per amore di completezza.

Consideriamo un cannone che lanci un proietto. Per effetto della forza esercitata dalla tensione dei gas che si sviluppano con l'accensione della carica di lancio, il proietto, dallo stato di quiete, passa allo stato di moto, con rilevante accelerazione. Mentre il colpo parte, possiamo osservare che anche il cannone subisce una spinta, precisamente nel senso opposto a quello del moto del proietto, che a noi si manifesta con il rinculo del cannone.

Se misuriamo la velocità del proietto e la moltiplichiamo per la massa del proietto stesso, otteniamo lo stesso numero che moltiplicando la velocità del cannone rimosso dalla quiete, per la sua massa. Poi che questa eguaglianza si verifica sempre

---

siano inversamente proporzionali alle accelerazioni, cioè a' è maggiore di a tanto quanto m è maggiore di m', o, in altre parole ancòra, le accelerazioni crescono tanto quanto diminuiscono le costanti m ed m'.

Questa costante rappresenta per ciò una qualche cosa che si oppone alla variazione dello stato di un corpo, cioè è la sua *inerzia* e la si chiama *massa* (Newton), la quale può considerarsi come la quantità di materia contenuta nel corpo; e si conviene che essa misuri appunto la quantità di materia. Dalla (*I*) si ricava che la massa è definita dalla relazione:

$$m = \frac{F}{a}$$

che un corpo sia soggetto ad una forza, il Newton se ne servì per formulare il *terzo principio della Meccanica, su le azioni e reazioni*, che ci dice come ogni spinta sia sempre accompagnata da una spinta di uguale grandezza, ma di senso contrario (10).

Dai tre principî che abbiamo considerati, la Meccanica si parte per le sue considerazioni: essi sono la solida base di quella scienza che Leonardo chiama «il paradiso delle scienze matematiche»; e da esse possono dedursi tutte le leggi della natura, poi che tutti i fenomeni naturali procedono dal

---

(10) La III legge della Dinamica si deve al Newton ed è nota sotto il nome di *legge di azione e reazione* che si enuncia: «ad ogni azione corrisponde sempre una reazione uguale e contraria».

Abbiamo visto nella nota precedente che $F = m.a$.

Sappiamo che a è la variazione di velocità nell'unità di tempo. Dopo un tempo t è evidente che la variazione sarà t volte a, cioè $a.t$. Se l'accelerazione sia impressa sin dal momento in cui il moto si inizia, partendo dallo stato di quiete nel quale la velocità v è uguale a zero, evidentemente dopo il tempo t, si avrà $v = a\,t$. Sostituiamo tal valore nella $F = m.a$. Avremo $F = ma$, $Ft = mv$. Ft si chiama *impulso* della forza, mv *quantità di moto* (Cartesio).

Torniamo alla III legge e, precisamente, all'esempio del cannone. Le due azioni durano lo stesso tempo, devono essere uguali ed essere misurate dalle quantità di moto che, come ben si comprende, rappresentano l'effetto delle forze agenti durante un tempo t. Cioè, indicando con m e m' le masse del cannone e del proietto, con v e v', a e a' rispettivamente le velocità e le accelerazioni dovremo avere: per il cannone $Ft = mv$, per il proietto $Ft = m'v'$; cioè $mv = m'v'$, relazione che giustifica il metodo sperimentale seguito per dimostrare la legge in parola.

moto. I tre principî, così, sono il fondamento di tutta la Fisica.

È importante quanto al riguardo ci dice Cristiano Huyghens (1629-1695) e cioè che: nella vera Scienza le cause di tutte le azioni, di tutti i movimenti, a meno che non si voglia rinunziare a comprendere qualcosa della Fisica, si devono concepire soltanto a traverso le considerazioni della Meccanica.

Capitolo III

I SISTEMI DI COORDINATE

Come abbiamo già detto, la Fisica vuole ricondurre tutti i fenomeni naturali, nelle loro cause più remote, a fenomeni di movimento svolgentisi nello spazio vuoto.

Da qui sorge il problema: come possiamo fissare, in generale, nello spazio vuoto, la esistenza di un movimento? È tutt'altro che semplice e per risolverlo dobbiamo profondamente riflettervi su; la soluzione avrà una speciale importanza per tutto quanto diremo in seguito.

Determinazione di un punto del piano. — Ma, prima che riferirci allo spazio vuoto, consideriamo qualcosa che sia più accessibile alla nostra mente, ad esempio la nostra camera. In qual modo possiamo stabilire che un corpo posto nella camera si muove?

Limitiamo ancòra il campo delle nostre considerazioni, da prima: al tavolo su cui scriviamo. Come percepiamo il moto di una pallina posta sul tavolo?

La risposta sembra semplice: Se la pallina si muove, in un dato tempo, essa deve mutare la sua posizione. Perfettamente. E il mutamento

della sua posizione può essere stabilito riferendoci ad altri oggetti che stanno fermi sul nostro tavolo, durante quel dato tempo. Se in un certo momento la pallina passa innanzi al nostro calamaio e, poco dopo, si trova vicina al portacenere, niuno può negare che la pallina si è mossa, se si sa con sicurezza che il calamaio come il portacenere hanno mantenuta, durante il tempo che consideriamo, la

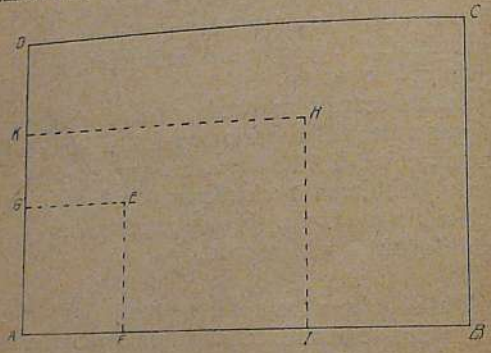

Fig. 5.

propria posizione, cioè non si sono mossi, condizione questa che dobbiamo ammettere come soddisfatta.

Ma se sul tavolo non vi sia alcun oggetto, o pure, se ve ne sia solo qualcuno in moto, la questione diventa un po' più difficile; ma sappiamo trarci d'impaccio.

La figura 5 ci rappresenti il piano della tavola: *A*, *B*, *C*, *D*, gli angoli; *AB*, *BC*, *CD*,

DA gli spigoli. Con *E* indichiamo la posizione del centro della pallina, in un dato momento, con *H* la posizione di tal centro in un qualsiasi momento successivo. La posizione della pallina può essere determinata, in ogni momento, misurando la distanza che intercede tra *E* e due spigoli consecutivi del tavolo, ad esempio, come nella figura, *AB*, e *AD* (tutte le altre coppie di spigoli consecutivi si equivarrebbero, per la bisogna).

Poi che per *distanza* di un punto da una retta si intende la lunghezza del segmento di perpendicolare abbassata dal punto su la retta, nella figura 5, la posizione di *E* è determinata dalla lunghezza dei segmenti *EF*, distanza da *AB*, ed *EG*, distanza da *AD*.

Poco tempo dopo, il centro della pallina si trova nel punto *H*: le sue distanze dai due spigoli considerati sono, rispettivamente, la lunghezza del segmento *HI* e la lunghezza del segmento *HK*.

Se esprimiamo i valori delle quattro lunghezze con una stessa unità di misura, ad esempio, in centimetri, troviamo che quelli della prima coppia *EF* ed *EG* sono diversi da quelli della seconda coppia *HI* ed *HK*. Il che significa che la pallina — abbiamo considerato per essa il suo centro — ha cambiato posizione, cioè si è mossa.

La figura 5 giustifica chiaramente al nostro occhio la conclusione che abbiamo tratta.

Il problema che ci siamo posto è stato così risolto; e la soluzione vale per ogni caso consimile.

Il caso trattato è il più semplice che possa immaginarsi, ma non è il solo. Se, tenendo ferma la pallina, spostiamo sotto di essa il tavolo, a quale conclusione ci condurrebbe la soluzione che abbiamo vista or ora?

Se misuriamo anche in questo caso due coppie di distanze esse ci si manifestano ancora diverse, perchè, di fatti, la posizione del centro della pallina, rispetto agli spigoli del tavolo, muta. E dobbiamo affermare, per ciò, che la pallina si è mossa. Pure noi, che abbiamo regolata la operazione, sappiamo di aver mosso il tavolo e di avere in vece mantenuta ferma la pallina.

Evidentemente in tal caso le misurazioni eseguite ci conducono ad una conclusione errata. Per ciò si rende necessario di rivedere il nostro giudizio e di formularlo con altri elementi, che possiamo facilmente trovare, cercando le cause che ci hanno indotti in errore. Come abbiamo convenuto di fissare il cambiamento di posizione della pallina?

a) Da prima riferendo ogni singola posizione ad oggetti *fermi;*

b) poscia riferendo ogni singola posizione agli spigoli del tavolo *fermo;*

c) poscia ancòra, riferendo ogni singola posizione agli spigoli del tavolo *in movimento* insieme con tutto il tavolo a traverso la stanza.

La causa del nostro errore consiste nell'aver voluto riferire il movimento di un corpo ad un altro pur esso in movimento.

Per evitare l'errore occorre rivolgerci ad oggetti

fermi. Nel nostro caso potremo trovarli nella camera stessa, considerando anzi che gli spigoli del tavolo, le pareti della camera.

Se, pur muovendo ancòra il tavolo, misuriamo due o più coppie di distanze del centro della pallina dalle pareti, in qualsiasi momento, le troviamo sempre uguali, naturalmente se teniamo sempre ferma la pallina: la pallina non muta nel tempo la sua posizione rispetto alle pareti (oggetti fermi), cioè è ferma. Gli spigoli del tavolo, in vece, in tempi diversi, distano diversamente dalle pareti, cioè occupano diverse posizioni nella camera, si muovono certamente.

L'avere riferito le nostre considerazioni alle pareti, anzi che agli spigoli del tavolo, evita la causa d'errore che abbiamo rilevata.

Ma non tutte le difficoltà sono superate, perchè non tutte le abbiamo considerate. Il nostro compito è quello di determinare un movimento nello spazio vuoto, privo, cioè, di oggetti ai quali possiamo riferirci. I problemi che abbiamo risolti sono casi particolari di uno più generale che presenta nuove difficoltà.

Determinazione di un punto dello spazio. — A base del nostro quadro del Mondo abbiamo dovuto prendere lo spazio che si estende illimitatamente come una enorme vasca vuota, maggiore di ogni altra che possiamo imaginare, nel cui interno ha vita il vasto divenire della natura, spazio che definiamo in *quiete assoluta*. Poi

che la nostra conoscenza, e presente e futura, non sembra possa oltre passare i confini di questo spazio — quando anche ci fossero — può sembrarci un « non-senso » il parlare di un *movimento dello spazio in se stesso*, cioè di un *movimento assoluto*.

Noi, con tranquilla coscienza, consideriamo quale spazio quella vasca in cui già Democrito vide tumultuare in vorticose trajettorie i suoi atomi che appare ai sensi dell'uomo come un mondo di miriadi di soli, di colori, di forme. E nutriamo la fiducia che, guidati dalle considerazioni svolte a mano a mano, tutte le difficoltà che presenta la soluzione del problema possano superarsi.

Or bene, nello spazio vuoto e fermo, imaginiamo disegnato un insieme di superficie piane matematiche, cioè aventi lunghezza e larghezza e non profondità, che ci rappresenta prospetticamente la figura 6.

AB e *CD* sono due rette, giacenti sul piano del foglio, che si incontrano in un punto *O* ortogonalmente, cioè ad angolo retto, di 90°. *EF* rappresenta una linea retta perpendicolare al piano su detto, nel punto *O*, prolungata oltre il piano, nella parte opposta al lettore, inclinata ad angolo retto con le rette *AB* e *CD*.

Le rette *AB* e *CD* determinano il piano del foglio; la coppia di rette *AB* ed *EF*, come pure la coppia *ED* ed *EF*, determinano ciascuna un piano, cioè, insieme, altri due, rappresentati entrambi sul piano del foglio ma situati, in realtà,

il primo come un muro centrale divisorio di un fabbricato, il secondo come l'insieme dei pavimenti di tutto un piano del fabbricato stesso. — In altre parole le tre rette AB, CD, EF individuano

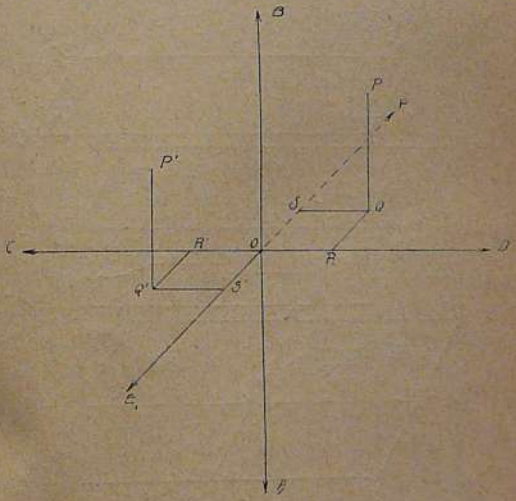

Fig. 6.

tre piani a due a due perpendicolari, incontrantisi nel punto O.

Se imaginiamo i tre piani prolungati illimitatamente in ogni direzione, essi divideranno lo spazio infinito in otto parti, ciascuna delle quali ancòra

illimitatamente grande (1), così come rappresenterebbe la figura prospettica 7 (aggiunta dai traduttori) supponendo prolungati oltre il foglio, ismi-

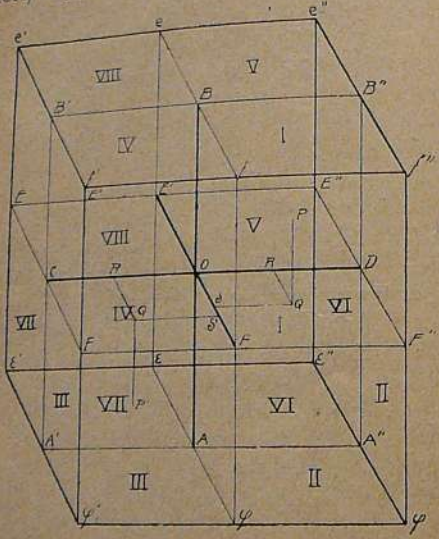

Fig. 7.

suratamente, i piani rappresentati dalle rette *AB*, *CD*, *EF* che si incontrano ancòra nel punto *O*.

---

(1) L'*infinito*, l'*illimitato*, non è commensurabile. Diviso in quante parti si vogliano, ciascuna di esse, se non ha limiti almeno in una direzione, è ancora illimitata, pur essendo solo una porzione dell'*infinito*, incommensurabile.

Se la figura 7 non basti a rappresentare quanto abbiamo detto possiamo pensare ad una scatola contenente delle saponette divisa in otto scompartimenti per mezzo di pezzi di cartone opportunamente ingommati l'uno all'altro, in modo che ogni saponetta sia sopra un'altra ma divisa da questa e da quella accanto, laterale, dai pezzi di cartone ingommati.

Nella figura 7 abbiamo numerate con simboli romani le porzioni di spazio che, lo ripetiamo, debbonsi ritenere illimitate.

Fissata la *I* possiamo determinare così le altre porzioni: *II* sotto; *III* sotto a sinistra; *IV* a sinistra; *V* dietro *I*; *VI* dietro *II*; *VII* dietro *III*; *VIII* dietro *IV*.

Con tali indicazioni possiamo distinguere esattamente, l'una dall'altra, le otto porzioni di spazio; ma, certo non possiamo usarle in una trattazione scientifica quale che questa sia. E per ciò bisogna sostituirle con altre di natura prettamente matematica, basate sul concetto che di due direzioni opposte l'una sia positiva, l'altra negativa; ad esempio, se, nella figura 6, *OD* è positiva, *OC* è negativa.

Per la nostra disamina sarebbe superflua qualsiasi parola in più su l'argomento; basta distinguere gli otto spazi in un qualunque modo, ad esempio con quello basato su i simboli numerici romani.

Individuate così le otto porzioni di spazio possiamo sempre determinare la posizione di un punto qualsiasi posto nello spazio illimitatamente grande.

Da prima occorre fissare in quale porzione spaziale si trovi il punto che ci interessa. Il punto P, ad esempio, si trova nello spazio I. La sua precisa posizione in questo spazio è fissata dai tre segmenti PQ, QR, RS, le cui misure ci danno le distanze del punto stesso dai tre piani: laterale (OB, OF), anteriore (OB, OD), inferiore (OD, OF), limitanti lo spazio in tre sue direzioni. P', in vece, si trova nella porzione III e i segmenti $P'Q'$, $Q'R'$, $Q'S'$ determinano, in modo del tutto corrispondente, l'esatta posizione di P'.

Se noi, quindi, troviamo un corpo, in un dato momento in P e in uno successivo in P', possiamo dire con perfetta sicurezza che il corpo considerato si è mosso nello spazio vuoto.

L'insieme dei piani caratteristici da noi considerato costituisce un *sistema di coordinate spaziali, cartesiane* (2). Il punto O si chiama *origine* del sistema. Le distanze PQ, QR, RS, ecc., si chiamano *coordinate* del punto P, ben s'intende nel sistema prescelto.

---

(2) Da Renato Cartesio (Descartes) (1596-1650) che, primo, le imaginò.

Capitolo IV

LO SPAZIO ASSOLUTO

Il compito della Fisica. — Da quanto precede risulta come possiamo ritenere che il compito della Fisica teorica sia quello di renderci comprensibile l'intero divenire della natura per mezzo di fenomeni di movimento nello « spazio vuoto ».

Per definire, localizzare un movimento nello spazio vuoto dobbiamo servirci di un sistema di coordinate con l'origine *ancorata* in un punto dello « spazio vuoto » in quiete. Tal punto può essere scelto comunque tra gli innumeri che, nel loro insieme, costituiscono lo spazio illimitatamente grande; ma una volta scelto come origine di un sistema di coordinate, dobbiamo considerarlo fissato per tutte le nostre successive indagini, se vogliamo dare un senso alle nostre definizioni di movimento. Quanto si è detto per l'origine vale anche per i tre piani coordinati del nostro sistema. Devono sempre essere a due a due perpendicolari ed intersecarsi tutti e tre nella origine scelta: la scelta delle loro direzioni è però del tutto indifferente.

Così stando le cose è assolutamente necessario di lasciar da parte per ora il concetto di spazio,

per non trovarci poscia di fronte ad insuperabili difficoltà. E possiamo farlo poi che il nostro sistema di coordinate allo stato di quiete ci offre un mezzo acconcio per renderci *rappresentabile* lo spazio vuoto. Le sue tre superficie piane comprendono senza lacune l'intero spazio e individuano la posizione di ogni punto dello spazio, anche del più lontano, con la determinazione delle tre coordinate.

Per ciò possiamo identificare lo spazio in quiete con il sistema di coordinate e fissare il problema massimo della Fisica, che consiste nella determinazione di tutti i movimenti, visibili o no, della materia universa, riferendoli ad un dato sistema di coordinate.

La soluzione del problema non è scevra di difficoltà. Infatti il suo enunciato presuppone l'esistenza di un punto qualsiasi dello spazio in quiete, nel quale si possa ancorare il nostro sistema, allo stato di quiete. Ma come trovare nel Tutto in perpetuo moto un punto si fatto che il maggiore ingegnere dell'antichità, Archimede (287-212 a. C.), invoca per sollevare il Mondo? (1) Come possiamo concepire lo spazio senza limiti, in perfetto riposo, noi che seguiamo il moto della Terra nella rotazione intorno al suo asse e che con essa ogni

(1) δὸς πᾶ στῶ, καὶ τὰν γᾶν κινήσω: « Dammi un punto d'appoggio e ti solleverò la Terra ». Tal detto si riferisce alla formidabile potenza che può esercitarsi con la leva, la prima delle macchine semplici che Archimede studiò compiutamente, giungendo alla nota condizione di equilibrio.

anno, in una ismisurata via, giriamo intorno al Sole? Dov'è questo spazio in quiete che gli astronomi ci annunciano corso per ignote vie dall'enorme sfera di fuoco, il Sole, accompagnato da una innumere teoria di pianeti?

La risposta a queste domande, che sono l'espressione della nostra infaticata volontà, scagliata contro l'ignoto, per disvelarlo, è strettamente legata alle considerazioni che, nel corso del tempo, hanno condotto a negare la immobilità della Terra, posta nel centro del Mondo, che, in vece, per lunghi secoli bui, interi popoli ammisero, ingenui e vergini di profonda cultura fisica.

Il pendolo e l'esperienza del Foucault. — Nella più semplice forma il pendolo consiste in una piccola sfera, che può essere sostituita da un punto materiale, sospeso ad un punto fisso, mediante un filo, che non possa allungarsi, e sottile, tanto da poterlo ritenere senza peso. A causa del suo peso la palla tende il filo all'ingiù e, per la legge di inerzia, sta immobile, insino a che una forza non la rimuova dallo stato di quiete.

Se però prendiamo la palla con una mano, la spostiamo dalla posizione primitiva, e, poscia — senza darle alcuna spinta — la abbandoniamo a sè, essa, muovendosi, oscillerà dall'una all'altra parte della posizione primitiva. Le leggi (2) che regolano

(2) La più importante tra le leggi del pendolo, cioè che « le piccole oscillazioni durano lo stesso tempo » è dovuta a Galileo che dalle oscillazioni di un lampadario del Duomo di Pisa,

tale movimento sono dedotte, con l'ausilio della Matematica, dalle tre leggi fondamentali della Dinamica. Dal suo canto la legge di gravità richiede che tutte le oscillazioni di un dato pendolo avvengano sempre con immutabile direzione, in uno stesso piano.

Ma l'esperienza provò di fatto che ciò non avveniva. Nel 1852 il fisico francese Leone Foucault (1819-1868) sotto la cupola del Panthéon di Parigi, fece oscillare una palla di 28 chilogrammi, appesa ad un filo di ferro lungo 67 metri, prolungantesi al di sotto della palla con una punta. Dopo alcune ore il Foucault rilevò, per mezzo della punta, una visibile deviazione nella direzione di oscillazione, contraddicente, come sappiamo, alle leggi fondementali della Dinamica.

Esaminiamo l'esperienza del Foucault.

Se lasciamo oscillare un pendolo per determinare il suo movimento, dobbiamo servirci di un sistema di coordinate. Nella esperienza del Foucault, la definizione delle oscillazioni del pendolo era fatta con riferimento alla superficie della Terra, meglio, con riferimento ad un sistema di coordinate, solidale con la Terra. Se in tale sistema di coordinate durante la durata di una singola oscillazione determiniamo le coordinate del massimo numero

---

osservato nel 1583, fu indotto a studiare le leggi del pendolo con più esatto metodo dei predecessori e con risultati migliori, ad esempio di quelli ottenuti da Girolamo Cardano (1501-1576).

possibile di posizioni, che il centro della palla assume nel suo movimento, otteniamo una serie di

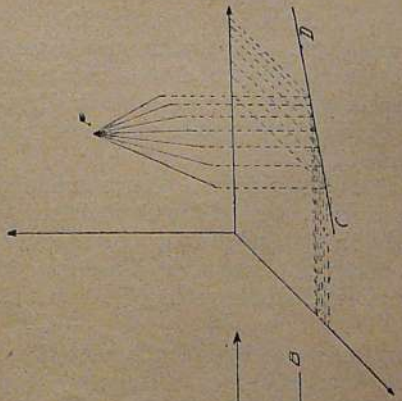

Fig. 8*b*.

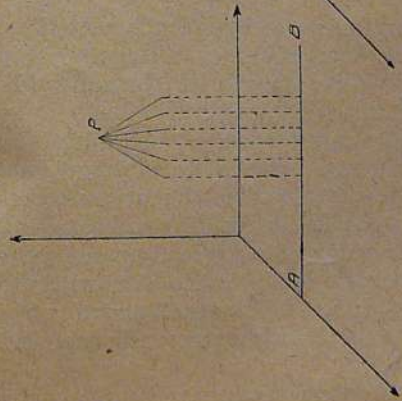

Fig. 8*a*.

punti tutti individuati, il cui insieme ci permette di ottenere la sua trajettoria, simile ad un arco

di cerchio, la cui direzione è rappresentata dalla retta *AB* (della figura 8*a*). Se il movimento del pendolo fosse quello previsto dalle leggi fondamentali della Dinamica, dopo un'unità di tempo, ad esempio dopo un'ora, rifacendo le misurazioni su dette, queste dovrebbero darci risultati identici a quelli prima ottenuti, cioè la direzione del movimento dovrebbe esserci ancòra rappresentata dalla retta *AB*.

In realtà otteniamo una figura simile a quella 8*b*, ben diversa, per la direzione del movimento, da quella 8*a*; la trajettoria, pur essendo ancòra un arco di cerchio, ha mutato direzione e la nuova ci è rappresentata dalla retta *CD*.

Evidentemente le leggi fondamentali sono contraddette. Come spiegarci tale contraddizione che, in realtà, è solo apparente? Ricordiamo l'esempio dato nel capitolo precedente.

Quando, tenendo ferma la pallina, facevamo muovere sotto di essa il tavolo, eravamo indotti a ritenere che la pallina si muovesse, perchè trovavamo che le successive coordinate, riferite al tavolo in movimento, cioè ad un sistema di coordinate solidale con il tavolo in movimento, erano diverse. La causa del nostro errore risiedeva appunto nella scelta non acconcia del sistema di coordinate.

Non diversamente avviene nel caso del pendolo.

Influenza dei movimenti della Terra. — Il sistema di coordinate scelto per determinare

il moto del pendolo è — come si è detto — solidale con la Terra, come quello scelto per la pallina era solidale con il tavolo.

Il risultato dell'esperienza del Foucault ci si manifesta come contraddittorio alle leggi fondamentali della Dinamica, poi che la torsione del filo, dovuta appunto alla deviazione del moto pendolare, è contraria all'affermazione contenuta in una legge del pendolo, derivata da quelle fondamentali. Se vogliamo considerare come esatte dette leggi (e quindi in generale tutte le leggi meccaniche) dobbiamo attribuire la torsione del filo non a deficienza od inesattezza delle leggi, ma alla impropria scelta del sistema di coordinate. Dobbiamo ritenere che durante il tempo trascorso dalla prima alla seconda serie di misurazioni il sistema di coordinate abbia girato nella direzione che indica la freccia della figura 8*a*, in modo che la retta *AB* assuma la direzione della *CD*. Tutto ciò non significa se non che la Terra gira intorno al suo asse passante per i due poli Nord e Sud. Con altre parole l'esperienza del pendolo del Foucault dimostra la rotazione giornaliera della Terra intorno al suo asse (3).

La rotazione della Terra intorno al suo asse è provata da altre numerose esperienze, ugualmente irrefutabili. Qui basti dire che i risultati sostan-

(3) Il Foucault comunicò la sua esperienza alla Accademia delle Scienze di Parigi nel 1851. Nota il Pitoni, nell'opera citata, che « si disse a ragione che questa esperienza dimostrava il movimento di casa nostra, senza bisogno di escir di casa ».

ziali di esse contraddicono le leggi fondamentali della Meccanica insino a che queste leggi sono espresse con relazioni riferite ad un sistema di coordinate solidale con la Terra e che in vece vi si accordano quando si tenga conto della rotazione del nostro pianeta, nella più parte dei casi. Nella più parte — si noti: non in tutti i casi — chè lo svolgimento di taluni fenomeni si allontana dalle previsioni teoretiche anche quando si consideri la rotazione in parola. Ma ecco ristabilita la concordanza tra le leggi formulate a fatica dall'uomo e quelle per le quali la natura manifesta un ossequio costante nella tangibile realtà, quando ammettiamo che la Terra ruoti intorno al Sole, su la via che ripercorre ogni anno, quando cioè trasportiamo il nostro sistema di coordinate dalla Terra al Sole.

Il movimento della Terra intorno al Sole infirma dunque la illimitata validità, nelle condizioni che abbiamo considerate, delle leggi meccaniche e naturali, su la superficie della Terra; ma in così esigua misura che la nostra giornaliera esperienza non ci palesa menomamente le deviazioni da tali leggi ed anzi conforta i risultati delle osservazioni scientifiche.

Influenza del movimento del Sole. — Ma non saremmo giunti ancora alla soluzione del problema che ci interessa, quando definitivamente ancorassimo nel Sole il nostro sistema di coordinate, per riferirvi i risultati delle nostre indagini fisiche.

Misurazioni estremamente curate dagli astronomi ci hanno provato che un sistema così ancorato non garantisce rigorosamente la validità delle nostre leggi fondamentali, perchè anche il Sole si muove, anche il Sole corre a traverso lo spazio senza confini, in una immensa via curva, sì che è necessario che il nostro perfetto vascello trovi altri porti.

Il punto fermo dell'Universo. — In quale porto dell'Universo tale vascello potrà servirci quanto vogliamo? La domanda non è nuova per chi ci ha seguiti sinòra: domanda imbarazzante quant'altra mai. Dove trovare un punto fermo nell'Universo che possa coincidere con l'origine di un sistema di coordinate in quiete, che possa rappresentarci lo spazio in quiete? Ma è necessario trovare una soluzione perchè solo con un sistema di coordinate veramente allo stato di quiete, le leggi fondamentali della Meccanica possono manifestarsi valide.

Nè la Terra, nè il Sole, nè qualsiasi altro corpo celeste fra quelli che conosciamo possono accogliere il nostro perfetto vascello. L'àncora deve infiggersi in un punto dell'Universo che sia in quiete assoluta. Questo è indispensabile.

Così abbiamo posto il problema: non lo abbiamo risolto e per la bisogna dovremo camminare per le vie dell'Universo, scegliere un punto qualsiasi e ancorarvi l'origine del nostro sistema; se la scelta ci manifesti contraddizioni alle leggi della Meccanica dovremo mutarlo, cercarne un altro ed altri

ancòra insino a che — per mero caso, forse — non avremo trovato quello che ci permetta di constatare la perfetta esattezza delle nostre leggi teorico-matematiche con l'esame sperimentale.

Lo spazio in riposo. — Abbiamo parlato sinora di sistemi di coordinate allo stato di quiete, non di spazio allo stato di quiete, fedeli a quanto abbiamo detto iniziando questo capitolo.

Ma il cammino percorso, in vero non troppo facile, ci permette ora di allontanarci un po' dal nostro proponimento e di dar forma alla concezione dello spazio allo stato di *quiete assoluta*.

Noi intenderemo per spazio allo stato di quiete assoluta quello in cui tutte le leggi naturali, ed in modo speciale, le fondamentali della Meccanica, sono verificate con assoluta precisione.

Il nostro problema è così compiutamente risolto e la soluzione ci soddisfa, poi che ci ha donato un sistema di coordinate al quale possiamo riferire tutti i fenomeni che si presentano alla nostra conoscenza, senza l'incubo di giungere a conclusioni errate.

Capitolo V

IL PRINCIPIO DI RELATIVITÀ DELLA MECCANICA CLASSICA

In una scena del « Faust » di Volfango Goethe si legge che nella domenica di Pasqua, dopo la passeggiata vespertina, il dottor Faust, torturato dal dubbio, si accinge a tradurre nel suo diletto tedesco l'evangelio di San Giovanni; quanto gli riesce difficile tradurre esattamente le prime parole del testo sacrò!

Uguale tormento per noi, non torturati dal dubbio, ma assetati di verità, nella ricerca affannosa dei termini più propri a tradurre il concetto di *spazio assoluto allo stato di quiete:* delusioni sempre nuove alla nostra speranza, quando credevamo di averli trovati, sino a che lo « spirito » non ci venne in aiuto, insino a che « anche noi » non « vedemmo ad un tratto chiarezza » e potemmo conoscere perfettamente il vero carattere dello spazio assoluto.

Il quadro del Mondo, che abbiamo descritto da principio, trova un solido appoggio nell'esito delle nostre fatiche, poi che, per esso, lo spazio ha un'importanza fondamentale, quale campo di visione degli innumeri fenomeni di movimento,

essenza immateriale della molteplice vita della natura.

Ma non tutte le delusioni abbiamo sinora patite: un'altra ci attende che è la maggiore fra tutte e della quale non potremo liberarci senza la rinuncia più assoluta alle antiche concezioni, rinuncia che non sarà inutile perchè ci offrirà la impensata possibilità di allargare le nostre conoscenze oltre confini sempre più vasti.

La nostra meta è certa e maravigliosa, ma lontana: bisognerà fare appello a tutte le nostre forze per potervi giungere.

Il moto in rapporto alla Prima legge della Dinamica. — Ammettiamo in vero, per un momento, di aver trovato lo spazio allo stato di quiete e, conseguentemente, un sistema di coordinate rispetto al quale i fenomeni naturali possano svolgersi in perfetta concordanza con le leggi fondamentali della Meccanica.

A traverso questo spazio, un veicolo, in cui prenda posto un fisico, che abbia con sè tutti gli istrumenti necessari per eseguire le più esatte misurazioni scientifiche, possa muoversi, senza attrito e senza incontrare altre resistenze, in una trajettoria rettilinea, percorsa in tutta la sua estensione con velocità costante, ad esempio di 10 metri al secondo. Poi che nello spazio assoluto tutte le leggi della Meccanica hanno piena validità, il moto, ubbidendo alla legge di inerzia, dovrà *permanere* rettilineo ed uniforme.

Lanciamo ora una palla nello spazio assoluto

allo stato di quiete, nella identica direzione del moto del veicolo. Anche il moto di essa sarà rettilineo: procuriamo che sia pure uniforme, ossia a velocità costante, ad esempio di un metro al secondo. Riferendoci al nostro sistema di coordinate, rispetto a questo, possiamo affermare che ad ogni secondo la palla percorre su la sua trajettoria rettilinea un tratto lungo un metro, e che tale risultato non muta quale che sia il momento in cui eseguiamo le misurazioni, poi che ci troviamo nello spazio assoluto in quiete, nel quale, relativamente al suo sistema di coordinate, il moto della palla deve seguire con rigore la legge di inerzia. Cioè, in breve: *la palla si muove, rispetto al sistema di coordinate solidale con lo spazio assoluto in quiete, con moto rettilineo ed uniforme e ubbidisce con rigore alla legge di inerzia.* Questo è il risultato delle nostre osservazioni eseguite fuori del veicolo.

Ma anche il fisico inizi ora le sue osservazioni e le sue misure sul movimento della palla. Quale ne sarà il risultato?

Ammettiamo che le inizi proprio nel momento in cui la palla, che si muove fuori del veicolo, sia accanto a lui. Egli trovi le coordinate riferite al proprio sistema della posizione del centro della palla corrispondente a tal momento, e ripeta le misurazioni e le osservazioni un secondo dopo. La palla, nel secondo che così trascorre, percorre rispetto al nostro sistema di coordinate in quiete, un metro innanzi, mentre il veicolo si sposta, nella stessa direzione, di 10 metri.

Il sistema di coordinate, solidale con il veicolo, è spostato in avanti, rispetto alla palla, di 9 metri, e il fisico, se, dopo detto secondo, determina le coordinate del centro della palla, riferite al proprio sistema di coordinate, individua una posizione che, rispetto a quella da prima fissata, è indietro di 9 metri. Il fisico, per ciò, conclude che la palla *rispetto al suo sistema, si muove con la velocità di 9 metri, con traiettoria rettilinea percorsa all'indietro.*

Che cosa si intende dire con ciò? Di per sè la conclusione non ha senso, e un matematico la esprimerebbe in una forma del tutto diversa, più esatta.

Ma noi dobbiamo accontentarci della forma meno esatta, per significare che il fisico ha osservato un movimento della palla, la cui direzione è opposta a quella che a noi appare, riferendoci al sistema di coordinate in quiete assoluta.

Trascorso un altro minuto secondo, cioè dopo due secondi, il fisico misuri di nuovo le coordinate del centro della palla, riferite al suo sistema di coordinate. Poi che durante questo successivo secondo, sia la palla che il veicolo, si saranno mossi rispetto al nostro sistema di coordinate, con velocità e direzione invariate, la palla, percorrendo un metro, il veicolo dieci, entrambi in avanti, il sistema di coordinate del veicolo si sarà portato innanzi alla palla di 9 metri; il che equivale a dire che la palla è rimasta indietro, rispetto al sistema del veicolo, di 9 metri. Il fisico troverà quindi la posizione del centro della palla, in un punto del suo sistema, arretrato di 9 metri, rispetto a quello

precedentemente determinato, e concluderà, senza tema alcuna di incorrere in un errore, che, anche durante il secondo minuto, la palla, relativamente al suo sistema di coordinate, si è mossa all'indietro sur una trajettoria rettilinea, con una velocità di 9 metri al secondo.

Per quante misurazioni egli ripeta, giungerà sempre a questo stesso risultato: ad ogni secondo, rispetto al suo sistema di coordinate, la palla rimane indietro di 9 metri e si muove sur una trajettoria rettilinea.

Riepilogando, il giudizio del fisico, sul fenomeno osservato e misurato, sarà che il moto della palla, riferito al suo sistema di coordinate, è rettilineo ed uniforme, e ubbidisce rigorosamente alla legge d'inerzia; e siccome l'obbedienza alle leggi della Meccanica è la caratteristica del sistema di coordinate allo stato di quiete assoluta, così, con perfetta logica, definirà il suo sistema di coordinate, come quello che si trova allo stato di quiete assoluta.

Nel nostro spazio allo stato di quiete assoluta noi possiamo sempre imaginare che si muova un veicolo; il fisico che prenda posto in questo, osserverà che il suo sistema di coordinate è assolutamente in istato di quiete, e per ciò che il suo veicolo, rispetto al nostro sistema, si trova egualmente in istato di quiete!

Evidentemente tale affermazione che ammette il veicolo come fermo quando in vece si muove, è un «non-senso». E ciò potremo far notare al fisico,

basandoci su la considerazione che, siccome ci troviamo nel nostro spazio in quiete, possiamo sempre, con assoluta certezza, stabilire il vero stato di quiete o di moto del suo veicolo.

Il fisico, molto probabilmente, ribadirà che, siccome rispetto al suo sistema le leggi della Meccanica hanno assoluta validità, così il suo sistema è veramente quello in istato di quiete assoluta, e che noi, rispetto al suo sistema, siamo in istato di movimento rettilineo ed uniforme e cioè che ci muoviamo ad ogni secondo di 10 metri indietro.

Se noi lo inducessimo ancòra a riflettere sul carattere assoluto del nostro sistema, egli, di rimando, ci chiederebbe in qual modo noi riconosciamo tale caratteristica. Per rispondere non ci rimarrebbe da dire se non che, anche rispetto al nostro sistema, le leggi della natura hanno completa validità. E così via: ci perderemmo in un inutile e vizioso giro di parole, senza veramente giungere ad una conclusione definitiva. Ma vi è una via d'uscita per liberarci dalla inconcludente schermaglia.

Il moto in rapporto alla seconda ed alla Terza legge della Meccanica. — Finora nelle nostre considerazioni, ci siamo serviti solo della Prima legge della Dinamica, trascurando interamente le altre due.

Facciamo agire su la palla in moto una qualsiasi, ma determinata forza, in direzione del moto della palla stessa. La grandezza della forza ci è data dal prodotto della massa della palla moltiplicato

per il valore della accelerazione che la palla acquista sotto l'azione della forza. La massa della palla è esprimibile con lo stesso numero sia nel sistema nostro in quiete, sia in quello che si muove insieme con il veicolo. L'accelerazione, nel nostro caso, è il valore dell'aumento, durante un secondo, della velocità della palla, e poi che, rispetto ad un tale sistema di coordinate allo stato di quiete, le leggi della Meccanica generale sono valide, tale valore deve essere costantemente espresso per una stessa forza determinata, da uno stesso numero, in qualsiasi tempo.

Per effetto dell'accelerazione impressale dalla forza, la palla si muoverà sempre più rapidamente: poniamo che l'aumento di velocità sia pari a cinque metri per ogni secondo. Se misuriamo la velocità della palla in tre secondi consecutivi, quali che essi siano, troviamo che la differenza di velocità tra un secondo ed il precedente od il seguente, è sempre pari a 5 metri.

Che cosa osserverà il fisico che cammina nel veicolo? Per semplicità, e soltanto per ciò, chè le nostre considerazioni non muterebbero in caso diverso, facciamo agire la forza nel momento in cui la palla si trova accanto al fisico, ben s'intende fuori del veicolo.

Dopo un secondo, il veicolo si trova, rispetto al nostro sistema di coordinate, 10 metri innanzi; la palla si muove ugualmente innanzi di un metro, prima che su di essa agisca la forza, e di un metro più cinque dal momento in cui la forza incomincia ad agire: in totale di 6 metri, per modo che, ri-

spetto al veicolo, la palla rimane indietro di 4 metri. Il fisico misurerà la sua velocità alla fine del primo secondo, in 4 metri, cioè inferiore di 5 metri rispetto a quella misurata prima che la forza agisse. Dopo il secondo minuto il veicolo, rispetto al nostro sistema, si è spostato ancòra di 10 metri e la palla, in vece, da prima, sotto l'azione della velocità, di 6 metri e poscia, sotto la successiva azione della forza, di 5 metri; in totale si è spostata di 11 metri, in modo che precede di un metro il sistema del fisico. Questi, riferendosi al proprio sistema, si rappresenterà così il fenomeno, su la palla ha agito una forza in senso opposto a quello del suo moto originario; per ciò il moto della palla successivamente, è stato frenato, si è svolto lentamente indietro, si è annullato, ha ripreso, con direzione rettilinea in avanti, e, in fine, è diventato sempre più rapido con il crescere del tempo, aumentando, ad ogni secondo, di cinque metri la sua velocità.

Per comprendere tutto ciò basterà ripetere ancòra una volta la osservazione. Giungeremo alla conclusione finale che il fisico, nel veicolo in moto, come identicamente noi, nel nostro sistema allo stato di quiete, constatiamo che su la palla moventesi in linea retta, innanzi, agisce una forza la quale, ad ogni secondo, imprime al suo moto una variazione (aumento) di velocità di 5 metri.

Con altre parole: da ambedue i sistemi, concordemente alla Seconda legge fondamentale della Dinamica, si deduce uno stesso giudizio, su la grandezza e su la direzione dell'azione della forza eser-

citata su la palla, per modo che, anche rispetto a tale legge, ambo i sistemi sono da considerarsi come equipollenti, sì che noi ed il fisico possiamo ritenere, con profonda persuasione, di trovarci nello spazio in quiete assoluta. Agli stessi risultati ci condurrebbe lo studio del moto in rapporto alla Terza legge su la eguaglianza delle azioni e delle reazioni: nè pure con l'aiuto di questa possiamo giungere ad una soluzione che decida sicuramente sul valore dei nostri sistemi.

Principio di Relatività della Meccanica classica. — La nostra sapienza, così, è giunta alla fine, poi che se, rispetto ad ambo i sistemi, quello in quiete e quello in moto, le tre leggi fondamentali della Dinamica manifestano un eguale valore, ciò sarà anche logicamente per tutte le altre leggi che da esse derivano. Cioè: *tutti i fenomeni naturali meccanici sono verificati in un sistema di coordinate allo stato di quiete esattamente nello stesso modo che in un altro sistema che si muova con moto rettilineo ed uniforme rispetto al sistema in quiete.*

Con ciò abbiamo certo espresso chiaramente che, riferendoci a fenomeni meccanici, non possiamo più parlare di *spazio allo stato di quiete assoluta*, la cui esistenza non ha potuto essere fissata, come si è poi visto, con fenomeni meccanici.

Un sistema di coordinate allo stato di quiete, non si distingue affatto dalla innumerevole quantità dei sistemi di coordinate in moto rettilineo ed uniforme.

Il concetto di *quiete assoluta*, come pure quello di *moto rettilineo ed uniforme*, diventano completamente privi di senso, perchè non realizzabili e né pure spiegabili, in sè e per sè.

« Quiete » e « moto rettilineo ed uniforme » sono appunto concetti *relativi*, cioè tali che assumono un significato soltanto se riferiti ad un sistema di coordinate.

Tale constatazione non è nuova, ed anzi ha origine con la fondazione della Meccanica scientifica dovuta al Galilei e al Newton; e si è per questo che noi diamo il nome di *Principio di Relatività della Meccanica classica* all'enunciato che la esprime (1).

La trajettoria di un moto in rapporto agli osservatori. — La esperienza quotidiana ci conferma pienamente la validità di tal principio senza tuttavia renderci edotti del vero

---

(1) È opportuno fissare l'attenzione sul fatto che tale principio si riferisce ai soli fenomeni *meccanici*. Con i quali, nella meccanica classica, si affermò l'impossibilità di mettere in evidenza il movimento *assoluto*, con velocità uniforme, della Terra.

Il principio di Relatività particolare dell'Einstein — lo si vedrà in seguito — non è se non una generalizzazione del principio di Relatività classica; in fatti esso vale anzi che per i soli fenomeni *meccanici*, per tutti i fenomeni *fisici*. — Mette qui conto di rilevare che l'esperienza del Foucault, ricordata nel capitolo IV, prova il movimento della Terra attorno al suo asse (moto di rotazione), non quello intorno al Sole (moto di rivoluzione). — Il che però non non vuol proprio dire che la Terra sia immobile.

rapporto di fatto intercorrente tra essa e il principio.

Riandiamo un po' indietro nel cammino percorso. Noi dicevamo che in un veicolo che si muova in direzione rettilinea e con velocità uniforme, possiamo giocare alla palla, come se stessimo su la strada. In entrambe tali condizioni, un sasso, abbandonato a se stesso, cade verticalmente e il nostro orologio, meraviglioso congegno meccanico, ci misura normalmente il tempo. Il sasso che cade, mette in evidenza, in modo particolarmente istruttivo e bello, la relazione che vorremmo ci palesasse chiaramente la esperienza.

Quando ci troviamo sul veicolo riferiamo il moto del sasso al nostro veicolo cioè, con espressione fisico-matematica, ad un sistema di coordinate solidale con il veicolo. Che cosa significa per noi che il sasso cade, dall'alto in basso, in linea retta se non che la sua trajettoria è perpendicolare alla superficie della nostra strada?

Ma un osservatore che stia su la strada, giudica ben diversamente il moto del sasso.

Egli vede la trajettoria del sasso che cade, come una linea curva che il matematico chiama parabola (vedi figura 4, pag. 4). Per tale osservatore che ha un sistema di coordinate solidale con la strada, il sasso compie due movimenti:

1.° quello di caduta verticale, dall'alto al basso;

2.° quello di traslazione, insieme con il veicolo, in avanti, lungo la strada, uniforme.

I due movimenti, secondo un importante principio della Meccanica (2) si riducono, per il nostro occhio, ad uno solo, e la trajettoria di questo movimento composto ha la forma di una parabola, come dimostrano e calcolo ed osservazione. Mentre dunque noi, che procediamo sul veicolo, giudichiamo che il sasso si muove dall'alto in basso in linea retta, l'osservatore che sta su la strada giudica che il sasso caschi con una trajettoria parabolica. Quale giudizio sarà il giusto? A chi spetterà decidere?

Ambedue i giudizi concordano con le leggi fondamentali della Meccanica. Infatti: per noi che stiamo sul veicolo il sasso è in quiete fino a che lo teniamo in mano; non appena abbandonato a sè viene a trovarsi sotto l'influenza della forza d'attrazione della Terra, e il conseguente moto di caduta segue perfettamente la legge su l'azione di una forza.

Per l'osservatore su la strada la palla da noi tenuta, così come noi e il veicolo, eseguisce un movimento rettilineo ed uniforme. Non appena abbandoniamo il sasso a sè, la forza d'inerzia tende ad impedirgli che il suo movimento muti; ma la forza di attrazione, in obbedienza alla Seconda legge fondamentale della Meccanica, lo costringe a cadere su la strada. I due movimenti si manifestano all'occhio dell'osservatore come uno solo, così come richiede la Meccanica e, di fatto, la trajettoria del sasso appare all'osservatore stesso parabolica.

(2) È il principio della composizione dei movimenti.

Evidentemente risulta come sarebbe un «non-senso» la ricerca della vera trajettoria della nostra palla che cade. *Il concetto di trajettoria è puramente relativo*, non materializzabile come un oggetto qualsiasi che assuma forme ed aspetto proprii: riferita al veicolo in moto, la trajettoria di caduta della palla è una linea retta, riferita alla strada è una parabola. Non si può parlare di contraddizione tra questi due enunciati, poi che ciascuno di essi è previsto dal calcolo, e convalidato precisamente dalla esperienza.

Siamo partiti nel nostro faticoso cammino, considerando lo spazio allo stato di quiete assoluta, nella quale la natura esplica la sua innumere vita meccanica.

Abbiamo visto che nei riguardi dei fenomeni di movimento, in quanto si verificano su trajettorie rettilinee e con velocità sempre costante, è cosa vana e priva di senso, il parlare di spazio in quiete assoluta, e per ciò abbiamo *relativizzato* (3) il concetto di spazio, rispetto a sistemi mossi uniformemente.

Ma possiamo non rinunziare ancòra una volta al concetto di spazio assoluto. Fin qui abbiamo parlato sempre di movimenti uniformi e rettilinei,

---

(3) Non esistono in italiano parole che traducano i termini usati dallo Schmidt e, spesso, dall'Einstein: *relativierung* e *relativiert*. *Relativizzazione* e *relativizzato*, però, rendono il senso delle due parole tedesche e aderiscono perfettamente al concetto che con esse sogliono esprimere i due autori citati: per ciò noi le usiamo.

e non di movimenti accelerati o ritardati o curvilinei.

Ma, l'esperienza — pensiamo ad una giostra in moto — ci dice che non sempre può riescirci il gioco della palla. E gli stessi moti della Terra e del Sole, si sono potuti stabilire, con esperimentazioni fisico-matematiche, appunto perchè, riferite a sistemi di coordinate in moto non costante e curvilineo, le leggi della Meccanica non sono più valevoli. Detti movimenti si sono potuti stabilire soltanto con l'ausilio di tale considerazione, ed il concetto di spazio ha acquistato un senso ben definito, dalla constatazione di essi che non ubbidiscono al principio di Relatività della Meccanica classica.

Infine, potremmo concepire un'altra speranza per conservare il suo carattere assoluto al concetto di spazio allo stato di quiete: il nostro quadro del Mondo ha voluto ammettere che la vita della natura non sia se non un complesso di fenomeni meccanici. Ma che cosa accadrebbe se non potessimo spiegarci tutti gli avvenimenti di questa innumere vita con il solo ausilio della Meccanica? Se si manifestassero fenomeni di natura non meccanica non potrebbero questi metterci in grado di dimostrare la esistenza di effettivi movimenti rispetto allo spazio assoluto e, quindi, la esistenza anche dello spazio allo stato di quiete assoluta?

Capitolo VI

L'ETERE COSMICO

Trasmissione del suono. — Ricordiamo un'esperienza molto istruttiva che si suole ripetere nelle scuole (1).

Dentro una campana di vetro, che aderisca nella parte inferiore ad un disco di legno, perfettamente sì da impedire che l'aria vi penetri senza controllo, poniamo una soneria elettrica, cioè una campanella metallica percossa continuamente da un martelletto, azionato da una corrente elettrica, che poggi sul disco per il tramite di un cuscino di bambagia. Se per mezzo di una macchina pneumatica estraiamo l'aria contenuta nella campana, a mano a mano che l'aria diminuisce, il suono della campanella si fa sempre più fioco, fino a che cessa del tutto.

Concludiamo veracemente che:

il suono consiste in una serie di oscillazioni dell'aria, cioè di onde, onde sonore;

le onde sonore non si destano in uno spazio privo di aria;

---

(1) Per maggiori dettagli, vedi: Murani, opera citata, volume I, pag. 434; Battelli e Cardani, *Trattato di Fisica sperimentale*, ed. dottor Franc. Vallardi, vol. II, pag. 75.

è dunque indispensabile, per percepire un suono, la presenza di un mezzo elastico che lo trasmetta, tra l'oggetto che lo desta e i nostri orecchi.

Trasmissione della luce. — Confrontiamo ora quel che abbiamo detto circa il suono con quel che avviene per la luce.

Sappiamo che per percepire la visibilità di un oggetto è necessario che esso invii verso i nostri occhi raggi di luce, propria o di una qualsiasi sorgente di luce, che lo illuminino. Infatti, in una stanza completamente buia, non riusciamo a vedere alcuno degli oggetti che ivi si possono trovare; soltanto quando la stanza sia illuminata, possiamo vedere gli oggetti che contiene.

Poniamo l'apparecchio, con il quale abbiamo esperimentata la propagazione della luce, entro una stanza illuminata. Vedremo il martelletto percuotere la campanella, sia prima che l'aria venga estratta dalla campana, sia dopo.

Dalle due esperienze concludiamo che:

la propagazione del suono richiede la presenza dell'aria tra l'oggetto che lo desta e i nostri organi uditivi;

per la propagazione della luce non è affatto necessaria la presenza dell'aria tra l'oggetto che vogliamo vedere ed il nostro organo visivo.

L'esperienza di tutti i giorni ci convince della verità delle nostre conclusioni. L'aria non riempie tutto lo spazio, nel quale vivono il Sole e le stelle

che vediamo perduti nel cielo; pure la loro luce ci riscalda nelle giornate estive o ci illumina nelle notti chiare, se bene giunga alla Terra da distanze impensabilmente grandi, nello spazio, soltanto in parte occupato dall'aria (2). Ma, come spiegarci questo fenomeno di propagazione della luce?

Ipotesi dell'emissione su la natura della luce (3). — Una spiegazione potrebbe essere

(2) I risultati degli studi fatti per calcolare l'altezza della atmosfera sono disparatissimi gli uni dagli altri. Plana: 46.164 m., Biot: 48.000 m., Liais: 380.000 m., Schiaparelli: 300.000 m., Stormer: 159.526 m. In media può ritenersi che l'altezza si aggiri intorno agli 80 chilometri.

(3) Tale ipotesi fu formulata dal Newton, nell'opera più importante che egli abbia scritta: *Ottica*, pubblicata già, in parte, nel 1675, e completamente, nel 1704; la si chiama anche *ipotesi del bombardamento*.

La ipotesi delle ondulazioni, abbozzata da un italiano, padre Francesco Maria Grimaldi (1618-1663), è dovuta a Cristiano Huyghens, esposta nell'opera pubblicata a Leida, nel 1690: *Traité de la lumière*. Per lungo tempo non ebbe fortuna, sì grande era l'autorità che godeva il Newton. Nel 1746, il matematico tedesco Leonardo Eulero (1707-1783), nel 1801, l'archeologo, medico e fisico Tomaso Young (1773-1820), ripresero le ipotesi dell'Huyghens, e, su le loro orme, intorno al 1820, l'ingegnere normanno Agostino Fresnel (1788-1827) diede forma completa, spiegando con essa i fenomeni ottici conosciuti, alla teoria *meccanica* delle ondulazioni.

Il colpo di grazia all ipotesi newtoniana fu dato dall'esperienza. Secondo quella la luce avrebbe dovuto propagarsi più velocemente nell'acqua che non nell'aria, secondo l'ipotesi Huyghens-Fresnel, in vece, più velocemente nell'aria che non nell'acqua: conclusioni espresse nell'esame del fenomeno di *rifrazione* che si verifica quando un raggio di luce, passando da un mezzo ad un altro di diversa intensità, incontri la superficie

quella che facesse consistere la luce in una miriade di piccolissimi corpuscoli rotondi, lanciati come fossero projettati, ininterrottamente dalla sorgente di luce, capaci di muoversi in tutte le direzioni, a traverso lo spazio vuoto, con velocità grandissime e con tale forza da poter superare distanze come quelle che intercedono tra i corpi celesti luminosi e la Terra.

Ma tale spiegazione, efficace sotto molti aspetti, diventa, sotto altri, contraddittoria con l'esperienza. Infatti, secondo tale ipotesi dovrebbe aversi che aggiungendo ad un raggio un altro raggio, cioè raddoppiando il numero dei corpuscoli,

---

di separazione con un angolo diverso da 90°, per il quale il secondo raggio devia. Le esperienze di Leone Foucault (1819-1868), istituite per suggerimento dello spagnuolo Francesco Arago (1786-1853) provarono che l'andamento delle velocità della luce relative all'aria ed all'acqua è quello previsto dalle ipotesi delle ondulazioni, cioè, come trovò nel 1850 Ippolito Luigi Fizeau (1819-1896), la velocità nell'acqua è minore di $^3/_4$ della velocità nell'aria.

La moderna *teoria elettro-magnetica della luce* non differisce da quella meccanica se non in quanto, anzi che a vibrazioni meccaniche, la luce si ammette dovuta ad oscillazioni elettriche.

Tale teoria, dovuta all'inglese Michele Faraday (1791-1867) fu successivamente sviluppata da James Clerk Maxwell (1831-1879) (che dalla eguaglianza del numero esprimente la velocità della luce con quello del valore del rapporto tra i numeri che esprimono il valore della intensità di corrente elettrica nel sistema di misura elettromagnetico e lo stesso valore nel sistema elettrostatico, dedusse che la luce non è se non un fenomeno della stessa natura di quelli elettro-magnetici) e da Enrico Hertz (1857-1894) e trovò in Augusto Righi (1850-1920) un autorevolissimo assertore (*L'ottica delle oscillazioni elettriche*, Zanichelli, 1897).

in tutti i casi si dovrebbe avere una maggiore luminosità per il doppio effetto dei raggi (corpuscoli) su l'occhio. L'esperienza ha però dimostrato che, in casi speciali, aggiungendo un raggio ad un altro raggio può annullarsi l'effetto di entrambi, ossia aversi l'oscurità (4). La spiegazione proposta non può per ciò reggere: occorre scartarla. E nuove difficoltà ci si presentano.

Fenomeni di interferenza. — Osserviamo la superficie delle acque tranquille di un lago, in un giorno di perfetta calma atmosferica, senza vento. Lanciamo su di essa un sasso: nelle acque si produce un'onda non dissimile da quelle del mare e sembra che le acque si muovano.

In effetti, però, non si ha lo spostamento di alcuna massa d'acqua, poi che ogni sua singola particella non si sposta, ma soltanto si porta su e giù, in direzione perpendicolare, della superficie delle acque tranquille; e lo possiamo constatare con un turacciolo di sughero lasciato cadere su l'acque: esso inizia una graziosa danza, su e giù delle acque, ma non si sposta, occupa sempre lo stesso punto. (Tutt'al più può darsi che una singola particella segua lo spostamento della sua vicina sol-

(4) Il che accade nei fenomeni di *interferenza* nei quali, come ebbe a dire il padre Grimaldi, può verificarsi che luce aggiunta a luce produca l'oscurità, fenomeni comuni anche all'acustica e noti similmente sotto il nome di fenomeni di *interferenza dei suoni* per i quali, in determinate condizioni, suono aggiunto a suono produce silenzio (vedi Murani, opera citata, vol. I, pag. 513 e seg., vol. II, pag. 223 e seg.).

tanto qualche momento dopo, in modo che, cioè, sia arretrato, si da far pensare ad un vero e proprio movimento delle acque). L'insieme dei singoli movimenti susseguentisi in modo continuo crea ai nostri occhi l'imagine di una sola onda in moto.

Lanciamo ora, su lo stesso preciso punto in cui cadde il primo, un secondo sasso. Evidentemente il fenomeno descritto dovrà ripetersi. Si tratta di vedere come si comportino le due onde, l'una rispetto all'altra.

Consideriamo due casi:

1.° Una determinata particella d'acqua, per effetto del lancio del primo sasso, passi dallo stato di quiete a quello di moto, verso l'alto, perpendicolarmente alla superficie. Contemporaneamente su la stessa particella, l'onda prodottasi in seguito al lancio del secondo sasso, agisca in modo da spingerla pure verso l'alto. Evidentemente i due effetti si sommeranno e la particella sarà portata ad un'altezza doppia di quella a cui si sarebbe portata per effetto della prima onda. Poi che tutte le particelle si comportano ugualmente, le due onde si sommeranno in una sola che avrà un'altezza doppia di quella di ogni singola onda (5).

2.° L'onda prodotta dal lancio del secondo sasso agisca sulla particella prima considerata in modo da tendere a spingerla all'*ingiù*. Quella particella, e con essa tutte le altre, in tal caso, è sog-

(5) Sotto tali condizioni si verificano i cosidetti fenomeni di *risonanza*.

getta a due forze uguali ma di senso contrario, così come una lunga fune resistente tirata alle sue estremità da due gruppi di giocatori, come nel noto gioco del « tiro alla fune ». Se i due gruppi esercitano una diversa forza, vediamo la fune spostarsi verso la parte di quel gruppo che esercita la forza maggiore e con la fune l'altro gruppo; ma se i due gruppi esercitano una forza eguale, per quanto essa sia rilevante, se resiste allo sforzo che ne deriva, la fune sta ferma, *tranquilla*, e i due gruppi permangono al loro posto iniziale.

La stessa cosa vale per la nostra particella d'acqua presa tra due forze, per effetto delle due onde, come abbiamo esposto: la particella non asseconda alcuna delle due, ma permane tranquilla alla superficie e, con essa, tutte le altre comprese nel campo d'azione delle due onde.

In tal modo abbiamo visto come, sotto determinate condizioni, una doppia formazione di onde possa conservare la più completa calma alla superficie in cui essa si manifesta.

Ipotesi delle ondulazioni su la natura della luce. — Tale fenomeno assume una maggiore importanza ricordando, come abbiamo detto, che, in determinati casi, dall'unirsi di due raggi di luce può aversi l'oscurità; suggerita da considerazioni di analogia, alla nostra mente può affacciarsi la possibilità di concepire la luce come un movimento di onde, concezione che ci permette di spiegare i fenomeni di interferenza della luce (come pure quelli, analoghi, del suono).

L'etere cosmico. — Ma quale sostanza trasmette le oscillazioni che ci manifestano la luce? Si comprende facilmente come senza una sostanza intermediaria sia impossibile la formazione delle onde. Ma abbiamo già visto che la luce può essere trasmessa anche a traverso lo spazio privo di aria; ed infatti nell'esperienza citata potevamo vedere il martelletto percuotere la campanella anche dopo che avevamo estratta tutta l'aria dalla campana.

Il che vuol dire che detta « sostanza-veicolo » non è certo l'aria.

Così la Fisica si trovò nella necessità di cercare una sostanza

— che riempisse tutto l'Universo — poi che esso è attraversato da raggi di luce — e la materia stessa — poi che, ad esempio, il vetro e l'acqua possono essere attraversati da raggi luminosi;

— che non fosse estratta insieme con l'aria dai recipienti sottoposti all'azione delle migliori macchine pneumatiche;

— che fosse imponderabile, senza peso, poi che se l'avesse avuto, si sarebbe riusciti a porlo in rilievo in molteplici esperienze;

— che possedesse la meravigliosa proprietà di non turbare menomamente il moto dei corpi celesti. Infatti, altrimenti la Terra dovrebbe incontrare nel suo moto intorno al Sole un attrito, più o meno rilevante, e per ciò ritardare il moto stesso, sì che la durata di un anno dovrebbe essere sempre maggiore. Il che non è stato constatato

dagli astronomi nè per la Terra, nè per qualsiasi altro pianeta, ad onta che le osservazioni siano state eseguite con metodi di assoluta precisione e con istrumenti sensibilissimi che potevano rivelare le più piccole variazioni.

La sostanza cercata, in conclusione, avrebbe dovuto avere le più caratteristiche miracolose proprietà. Non la si trovò: la si imaginò — se bene a malincuore — sopra tutto per spiegare l'enigma, altrimenti insolubile, del modo di propagarsi della luce, e la si chiamò *etere cosmico*, divenuto ora, per la Fisica teorica, fonte di dolorosi crucci.

Ma un'altra proprietà ancòra doveva avere l'etere. Infatti, dovendo agire come veicolo delle onde della luce, per la necessità di attribuirgli proprietà elastiche, doveva essere considerato anche come un corpo solido, già che l'indagine fisica ha dimostrato che le vibrazioni simili a quelle della luce (6) possono aver luogo soltanto nell'interno di un corpo solido.

Ma, se l'etere riempie gli illimitati spazi interplanetari, a traverso i quali corre la Terra, come non pensare che la Terra stessa possa non trovare alcun impedimento al suo moto secolare? Da tale considerazione sorge spontaneo il pensiero della impossibilità.

La Terra — si è detto — e tutti gli altri innumeri corpi che solcano luminosamente i cieli, nel muoversi, *trascinano l'etere*. Ma anche tale ipotesi

(6) Cioè traversali.

deve essere decisamente respinta. Infatti, se la si ammettesse, bisognerebbe anche ammettere che un raggio di luce solare sarebbe deviato, in una certa misura, dal movimento dell'etere, deviazione che non si è potuto rilevare con le osservazioni e le misure più esatte.

Non possiamo dilungarci per dire come i varî fisici si siano affaticati, in tutti i tempi, a porre d'accordo le qualità contraddittorie della miracolosa sostanza.

Può dirsi, con buon fondamento, che vi sono tante teorie su l'etere quanti sono i fisici di fama, poi che ciascuno di essi ne ha creata una propria, respingendo quella degli altri. Tutti però sono d'accordo nel ritenere, ad onta di tutte le difficoltà che si incontrano quando si voglia stabilirne l'essenza e le proprietà, che l'etere è qualche cosa in certo qual modo esistente.

E la teoria dell'etere, infatti, ha recato un grande vantaggio, poi che conduce alla unità di causa i fenomeni che si svolgono nel Mondo.

Non i raggi di luce soltanto, sì bene anche i raggi calorifici e le oscillazioni elettriche si presentano come fenomeni dovuti a onde propagantesi diversamente nell'etere. E ancòra: consideriamo il primo fenomeno elettrico che ci si presenta nello studio dell'elettricità. Se si strofina una bacchetta di ebanite con un pezzo di flanella e la si avvicina a pezzetti di carta, questi sono attratti anche quando tra la bacchetta e la carta non vi è aria.

L'attrazione è dovuta alla presenza di forze elettriche. Sta bene. Ma come queste possono agire a distanza, a traverso lo spazio vuoto? Soltanto ricorrendo all'etere possiamo rispondere a tale dimanda, ritenendo cioè che l'etere venga a trovarsi, per effetto delle forze elettriche agenti, in uno stato di tensione che si estenda dal contorno della bacchetta sino alla superficie dei pezzettini di carta. Con tale supposizione, per spiegare i fenomeni elettrici non vi è bisogno di ammettere ciò che è inconcepibile: un'azione di forza a distanza (7). E l'etere, infatti, rende comprensibile, senza far ricorso a tale ammissione, tutti i fenomeni elettrici e quelli magnetici; ma annettendo all'etere stesso proprietà che non ci sogneremmo mai di attribuire ad altra sostanza. L'etere diventa così una materia di peculiari qualità, una sostanza onnipresente, che tutto penetra, impalpabile, elasticissima (8), sottilissima, a traverso la quale i corpi si muovono, come un grano di sabbia a traverso uno staccio.

---

(7) Dalle formule fondamentali della teoria di Relatività particolare si deduce che la velocità della luce è la massima tra tutte le possibili velocità, e per ciò, la impossibilità di azioni istantanee (il che vuol dire: a velocità infinitamente grandi) e, quindi, la assurdità del parlare di *azioni a distanza* fra i corpi celesti. Così tale assurdità è stata anche recentemente colpita in pieno; e, come si vedrà, la teoria di Relatività, pur *astraendo* dall'esistenza dell'etere, esilia da sè, senz'altro, l'ammissione veramente gratuita delle azioni in parola.

(8) Eulero suppone l'etere di 39 milioni di volte più tenue dell'aria e 1278 volte più elastico dell'aria stessa.

Capitolo VII

L'esperimento Michelson - Morley e la spiegazione secondo H. A. Lorentz

Il principio classico di Relatività. — Il principio di Relatività della Meccanica classica aveva dato un duro colpo alla concezione antica dello spazio; un altro gliene riserbava rendendo impossibile la distinzione dello spazio allo stato di quiete assoluta dallo spazio in moto rettilineo ed uniforme, sì da rendere puranco necessaria una relativizzazione del concetto di spazio, limitatamente, però, a fenomeni meccanici.

Avevamo spesso accennato che, in sostanza, l'intero divenire naturale non è se non un insieme armonico di fenomeni meccanici; per ciò dobbiamo ora bandire definitivamente dal nostro quadro del Mondo lo spazio assoluto.

Con l'accettazione dell'etere cosmico la Fisica teoretica si era posta in condizioni tali da poter spiegare, per mezzo di procedimenti meccanici, i fenomeni ottici e magnetici; e si era per ciò potuta dividere in due grandi gruppi tutta la Meccanica: la *Meccanica dei corpi materiali* e la *Meccanica dell'etere*. Nella prima regnava sicuramente il principio di Relatività; tal principio doveva valere anche nella seconda?

Da prima lo si negò recisamente, poi che all'etere

doveva attribuirsi il carattere di una sostanza allo stato di assoluta quiete, occupante l'intero spazio del mondo, a traverso la quale si muovono tutti i corpi, senza che questi la trascinino seco nel loro moto.

Il definire l'etere come lo spazio in quiete assoluta, avrebbe dunque un senso molto limitato ed un sistema di coordinate la cui origine fosse ancorata nell'etere, dovrebbe nettamente distinguersi dai sistemi di coordinate posti in un qualunque corpo celeste. Con altre parole si dovrebbe poter riconoscere, in qualche modo, il movimento di un corpo esistente nell'etere, ad esempio, il movimento della Terra, relativamente all'etere. Il nostro compito è ora quello di trovare un modo acconcio a tale bisogna.

La velocità della luce. — La luce, concepita quale mutamento dello stato dell'etere, si propaga in tutte le direzioni con velocità sempre uguale, precisamente di 300.000 chilometri al secondo, valore questo che appare estremamente grande quando si pensi che, essendo la lunghezza della circonferenza equatoriale di circa 40.000 chilometri un raggio di luce la dovrebbe percorrere, con detta velocità, in un secondo, sette volte e mezzo.

Naturalmente tal valore della velocità vale quando sia riferito ad un sistema di coordinate posto nell'etere.

Un fisico che si proponga di misurarla deve procedere come segue:

Da un punto fisso ed immobile dell'etere, individuato per mezzo di tre coordinate, riferite al suo sistema, deve inviare ad un dato istante ed in una qualsiasi direzione, un raggio di luce; ciò fatto deve misurare le coordinate del punto che ha raggiunto il raggio, dopo un minuto secondo. Con le indicazioni così ottenute, cioè con i due gruppi di coordinate, può calcolare la distanza della trajettoria della luce, tra il punto di partenza e quello di arrivo. In tal modo si ha la lunghezza del percorso di un raggio durante un secondo e, in pari tempo, la misura della velocità della luce.

Ora, poi che la Terra nel suo moto intorno al Sole ha una velocità di 30 chilometri al secondo, come potrà il fisico valutare su la Terra la velocità della luce?

Intanto, è certo che, dal momento in cui un raggio di luce viene emesso da un corpo — non importa in qual modo — esso appartiene all'etere, poi che, secondo la concezione comune, esso non rappresenta se non un determinato mutamento dello stato dell'etere. A noi non interessa conoscere, nel caso considerato, come tal mutamento avvenga; noi teniamo conto soltanto del fatto che *la luce si propaga a traverso l'etere con una velocità di 300.000 chilometri al secondo.*

Dopo un secondo dalla emissione, un raggio di luce ha certamente raggiunto un punto dell'etere che dista di 300.000 chilometri da quello, pure nell'etere, nel quale si trovava la sorgente luminosa nell'istante in cui emetteva detto raggio.

Ma la sorgente di luce, poi che è solidale con la

Terra, durante il secondo considerato, ha percorso 30 chilometri rispetto all'etere. Se noi inviamo, per ciò, ora, un raggio di luce nella direzione (1) e nel senso del moto della Terra, alla fine del primo secondo la sorgente di luce disterà dalla estremità del raggio 30 chilometri in meno dei 300.000, cioè 299.970 chilometri. Un fisico che si trovi su la Terra e che, quindi, riferisca le sue misurazioni ad un sistema di coordinate solidale con la Terra, deve per ciò giungere al risultato che, *nel senso del movimento della Terra*, la velocità della luce è di 299.970 chilometri al secondo.

Se il fisico, in un successivo esperimento, invia un raggio di luce verso la Terra che si muove, cioè *in senso opposto* al movimento di questa, allo scoccare del primo secondo la sorgente di luce non disterà dalla testa del raggio soltanto dei 300.000 chilometri percorsi durante il minuto considerato, ma, in più, dei 30 chilometri percorsi pure dal raggio nel senso precisamente opposto. Per quel fisico, la trajettoria percorsa dalla luce in un secondo risulterà di 300.030 chilometri.

(1) Consideriamo il tronco ferroviario Milano-Pavia: esso rappresenta la *direzione* del moto di un treno Milano-Pavia, quale che sia, tra le due, la località di partenza; mentre, in vece il *senso* del movimento include la fissazione della località di partenza, rimanendo determinata, in tal modo, la località di arrivo. Evidentemente un treno che da Milano si porta a Pavia si muove in *senso opposto* a quello che da Pavia si porta a Milano.

Così abbiamo precisato il significato di *senso* e *direzione*. Abbiamo voluto farlo perchè nel linguaggio comune si adopera spesso *direzione* per *senso*.

Con altre parole: *la velocità della luce su la superficie della Terra diminuisce od aumenta di 30 chilometri, a seconda che il raggio sia diretto nel senso del moto della Terra, o in senso contrario*, differenza su la base del valore della velocità normale con cui la luce si propaga nell'etere.

Sarà opportuno servirci di qualche esempio pratico che possa esserci di guida in una esperienza, semplice per chi che sia, allo scopo di chiarire il senso delle considerazioni che abbiamo sinora svolte.

Imaginiamo di essere in treno: la velocità dei treni che, guardando fuori del nostro finestrino, vediamo correre su i binari accanto a quello sul quale passa il nostro, è per noi essenzialmente diversa da quella che apprezza un guardiano ferroviario, dalla sua cantoniera.

Ogni treno che si muova nello stesso senso del nostro, ci sembrerà che proceda molto più lentamente di quanto non sembri al guardiano, precisamente in misura pari alla velocità del nostro treno. Perchè ciò?

Per semplicità esprimiamo la velocità del treno con il numero dei finestrini che, in un secondo, passano oltre un dato punto, o che il treno mostra ad un osservatore.

Ciò premesso, al guardiano fermo, il treno mostri in un secondo, 20 finestrini, ed altrettanti ne mostri a noi, che siamo pure in treno, in moto con una velocità esprimibile con il passaggio, d'innanzi al guardiano, di 12 finestrini. Se i due treni si

muovono nello stesso senso vedremo passarci innanzi otto finestrini dell'altro treno; se in vece i due treni si muovono in senso opposto, noi vedremo, ad ogni secondo, 20 suoi finestrini, mentre noi corriamo di 12 finestrini, per modo che, complessivamente, la nostra velocità è — diremo così — esprimibile in 32 finestrini; il guardiano, in vece, vede sempre 20 finestrini.

Giungiamo così all'importante risultato che su la Terra il valore della velocità di propagazione della luce è strettamente legato al senso della propagazione stessa. In effetti, però, le differenze massime che possono verificarsi, in conseguenza di ciò, sono quasi trascurabili in confronto del numero che esprime il valore della velocità della luce nell'etere.

L'esperimento Michelson-Morley. — La Fisica moderna possiede metodi molto perfezionati che valgono a renderci possibile l'esame sperimentale delle nostre conclusioni: un apparecchio costrutto a tale scopo può trovar posto in una spaziosa sala.

È noto come la trajettoria che segue la Terra nel suo moto di rivoluzione intorno al Sole, ossia la sua *orbita*, abbia la forma di un ellisse. Il moto della Terra è, quindi, curvilineo e, ubbidendo alle leggi del Keplero, non conserva in tutto il suo percorso, una velocità uniforme. Ma per le esperienze che noi dobbiamo fare, possiamo considerare

che il moto della Terra sia rettilineo ed uniforme, e ciò senza assumere alcuna gratuita ipotesi, poi che i matematici possono dimostrarci, rigorosamente, che la trajettoria della Terra, da noi considerata, può scomporsi in un numero grandissimo di segmenti rettilinei, percorsi tutti con velocità uguale.

Per misurare comodamente la differenza di velocità alla quale abbiamo accennato, i fisici americani Albert A. Michelson e Edward Williams Morley istituirono una esperienza (2), il cui andamento ci è schematicamente suggerito dalla figura 9.

Dalla sorgente *L*, un raggio di luce colpisce lo

(2) La ormai classica esperienza alla quale si riferisce questo capitolo fu istituita dal Michelson (1852) nel 1879 ad Annapolis e nel 1882 a Cleveland riprendendo le esperienze eseguite dal Fizeau nel 1851, ripetuta dallo stesso Michelson in unione con il Morley nel 1887, e ancòra, nel 1905 dal Michelson, dal Dayton e dal Miller, con apparecchi e metodi sempre più perfetti.

Augusto Righi negli ultimi anni della sua vita si era dedicato con particolare cura allo studio della esperienza e sono sue le memorie presentate all'Accademia di Bologna nel 1919: «*L'esperienza di Michelson e la sua interpretazione*», e nel 1920 «*Sulle basi sperimentali della Teoria della Relatività*» e «*Sopra una nota relativa all'esperienza del Michelson*». — Il Righi aveva studiata una esperienza, esposta in «*Sulla Teoria della Relatività e sopra un progetto di esperienza decisiva per la necessità di ammetterla*» (18 aprile 1920) che avrebbe dovuto fornire una prova inoppugnabile della validità o meno della Teoria di Relatività; ma la morte lo colse improvvisa, quando le difficoltà finanziarie che si frapponevano alla esecuzione dell'esperienza erano state superate con la donazione dei fondi necessari, da parte della Cassa di Risparmio di Bologna.

specchio semitrasparente S che suddivide il raggio stesso in due altri: l'uno nella direzione del movimento della Terra, (il senso è indicato dalla frec-

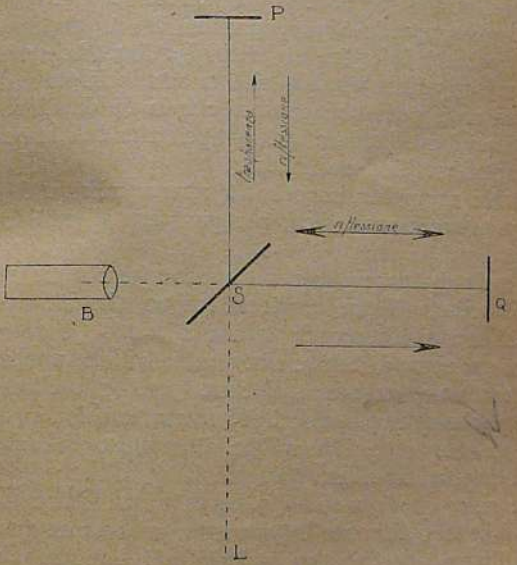

Fig. 9.

cia) giunge fino allo specchio Q che lo riflette, nel senso contrario al moto della Terra, rimandandolo così in S; l'altro raggio attraversa lo specchio S, perpendicolarmente al moto della Terra, rag-

giunge lo specchio P, che dista da S quanto ne dista da Q, e da P è riflesso, come il primo, in S.

Consideriamo da prima il raggio di luce SQ. Per effetto del moto della Terra, che avviene nello stesso senso della propagazione del raggio, la sua velocità è inferiore ai 300.000 chilometri, mentre ne è superiore quando rifà la strada in senso opposto. Si potrebbe pensare che la diminuzione di velocità nell'andata sia compensata dall'aumento che si verifica nel ritorno.

Ma rappresentiamoci il fenomeno ricorrendo ad un esempio numerico, per giungere ad un sicuro giudizio.

Ammettiamo, per un momento, che la velocità della Terra, anzi che di 30, sia di 100.000 chilometri al secondo, e che il tratto QS non sia lungo, come di fatto nella esperienza che vogliamo descrivere, 11 metri, si bene 300.000 chilometri. Poi che nelle condizioni accennate, la velocità della luce, nel senso SQ sarebbe di 200.000 chilometri, il raggio dovrebbe giungere in Q, riflessovi da S, dopo un secondo e mezzo. Da Q la luce viene riflessa verso S e durante il percorso avrebbe, per quanto abbiamo detto, una velocità di 400.000 chilometri al secondo, sì da tornare in S sopo $^3/_4$ di secondo. Cioè l'intero percorso SQ (andata e ritorno) sarebbe compiuto in $1^2/_4 + {}^3/_4 = 2^1/_4$ secondi, mentre, se il raggio di luce avesse, sia in un senso che nell'opposto, la stessa velocità di 300.000 chilometri al secondo, esso tornerebbe in S dopo due secondi.

I numeri che entrano in gioco nella vera esperienza Michelson-Morley sono essenzialmente più piccoli di quelli che noi abbiamo considerati; ma il fenomeno non per ciò è stato alterato nel suo svolgimento o nei suoi risultati sostanziali, che a noi interessano, più che per il loro valore numerico « quantitativo », per il loro valore « qualitativo ».

In seguito al movimento della Terra, la luce, così, impiega un tempo maggiore di quello che impiegherebbe se la Terra fosse ferma, per correre da S in Q e viceversa.

Il secondo raggio di luce, al quale sinora abbiamo soltanto accennato, si muove, tanto nell'andata, cioè da S a P, quanto nel ritorno, cioè da P a S, in direzione perpendicolare al movimento della Terra, che influisce anche in questo caso su la velocità della luce, ma in modo identico in entrambi i sensi, cioè del tutto diversamente da quanto avveniva nella direzione del movimento della Terra.

Per ciò, per amore di brevità, possiamo senz'altro considerare che la Terra non influisca affatto, con il suo movimento, su la velocità di propagazione del secondo raggio. Con ciò noi ammettiamo, senz'altro, che il secondo raggio percorra la sua trajettoria con la velocità normale della luce, nell'etere, ossia che esso giunga in S un certo momento avanti del primo raggio. Conseguentemente si presenta a noi un fenomeno di interferenza che può esser calcolato teoricamente, osservato e misurato da B, con l'aiuto di speciali istrumenti,

che non è necessario siano descritti per la nostra trattazione. Fin qui giungono le considerazioni teoretiche che derivano dall'ammettere, per la spiegazione dei fenomeni luminosi, la esistenza dell'etere, ed insieme l'influenza del moto di rotazione della Terra intorno al Sole.

L'esperienza Michelson - Morley, ripetutamente eseguita, *non rilevò assolutamente una possibile azione di tal moto*, se bene gli apparecchi usati fossero tanto sensibili da poter registrare, con esattezza, se vi fosse stata, anche la centesima parte dell'azione del dettò movimento.

All'etere si era ascritta una fondamentale importanza non solo nei riguardi dei fenomeni ottici, ma anche nei riguardi dei fenomeni elettro-magnetici. Vi fu la possibilità di riprodurre, con esperienze elettriche, taluni fenomeni il cui svolgimento doveva essere influenzato dal moto della Terra. Qui basti accennare alla questione, per concludere che in alcuna delle esperienze elettro-magnetiche, eseguite da Lord Rayleigh (1842-1919) e il Brace, dal Trouton e il Noble, da Guglielmo Rankine (1826-1872) e dal Trouton, *non si potè registrare l'attesa influenza del moto della Terra.*

Ma come spiegarci sì fatta conclusione?

La contrazione di Hendrick Lorentz. — Una prima risposta a questa domanda ci fu data nel 1903 dal fisico olandese H. A. Lorentz (1853) fedele fautore della concezione dell'etere.

Questi, per spiegarci l'inatteso risultato della

esperienza Michelson-Morley, affacciò una ipotesi, in apparenza molto strana, per la quale ogni corpo, anche se rigido, deve subire, muovendosi a traverso l'etere, un certo accorciamento, nella direzione del moto, una cosiddetta *contrazione* (3), mentre rimane invariato, nelle sue dimensioni, nella direzione normale al moto.

Anche la Terra dovrebbe quindi accorciarsi nella direzione del suo moto, e su di essa, la distanza dei due specchi S e Q della esperienza Michelson-Morley, esattamente di quanto neces-

(3) Se indichiamo con l la dimensione di un qualsiasi oggetto in quiete, parallela alla direzione del moto da cui sarà animato il corpo stesso, con l' la lunghezza raccorciata per effetto della *contrazione del Lorentz*, con v la velocità relativa del corpo, quando lo si metta in moto, con V la velocità della luce, possiamo scrivere la relazione seguente (dedotta da un sistema di formule, note con il nome di formule della *trasformazione del Lorentz:* per distinguerle da quelle della *trasformazione di Galileo* dalla Meccanica classica):

$$l' = l\sqrt{1-\left(\frac{v}{V}\right)^2}\ ;\quad \sqrt{1-\left(\frac{v}{V}\right)^2}$$ è il

coefficiente di contrazione, che si suole esprimere con β.

Si comprende come $\left(\frac{v}{V}\right)^2$ non possa essere, per le ordinarie velocità degli oggetti, il cui moto possiamo comunemente osservare, se non molto piccolo, tale da essere completamente trascurabile e da rendere, quindi, tutto il coefficiente uguale ad *uno*, per modo che l ed l' sono approssimativamente identici, cioè la lunghezza di un corpo in moto è pari a quella del corpo in quiete. Superata ogni difficoltà di ordine, diremo così scientifico-pratico, la constatazione diretta del raccorciamento diventa impossibile per la ***esiguità*** del raccorciamento stesso.

sita per eliminare la differenza dei tempi impiegati per percorrere le distanze SQ (andata e ritorno) ed SP (andata e ritorno), per modo che, ambedue i raggi possano incontrarsi di nuovo in S nello stesso istante. Ciò perchè la presunta variazione di velocità durante il percorso SQ è sostituita dal raccorciamento del percorso stesso, per il quale la luce, sia da S verso Q, che da Q verso S, impiega lo stesso tempo che per percorrere la distanza SP (da S verso P e viceversa), rimasta invariata durante il movimento della Terra.

Per tale ragione, *l'esperienza Michelson-Morley non può manifestare l'azione del moto della Terra su la velocità di propagazione della luce.*

Il Lorentz con mezzi logici riescì a porre in armonia con la sua ipotesi anche i risultati degli esperimenti elettro-magnetici, dei quali abbiamo fatto cenno.

È naturale che ci si chieda ora se non sia possibile di rivelare la contrazione supposta dal Lorentz, per mezzo di misure dirette. Domanda questa che, purtroppo, non può avere una risposta affermativa; il che può ben comprendersi quando si pensi che dovendoci servire per misurare, ad esempio, la lunghezza SQ, di un regolo graduato, di uno strumento qualsiasi, e riportarlo un certo numero di volte lungo il tratto da misurare, anche il regolo, posto nella direzione di SQ, deve contrarsi (poi che anch'esso si muove a traverso l'etere) nella direzione del suo moto, cioè di SQ; in una parola sia SQ che il regolo di misura si contrag-

gono e, contraendosi nella stessa proporzione, l'accorciamento è, diremo così, mascherato (4).

Si vede quindi come non possa parlarsi di una conferma o confutazione, basata su la esperienza della ipotesi del Lorentz (5), che per ciò ci soddisfa poco, così come ha soddisfatti poco gli scienziati, che, alle altre innumeri incognite del misterioso etere, dovettero aggiungere anche quella della sua influenza su la grandezza dei corpi che si muovono in esso, e porsi, quindi, un nuovo problema.

Per dirla con il matematico di Zurigo Hermann Weyl (6), discepolo dell'Einstein, così « sorse per la Meccanica dell'etere il compito di spiegare anche questa meravigliosa influenza che l'etere esercita su la materia, come per dire ai fisici, una volta per sempre: Voi fisici non mi afferrerete mai! »

---

(4) Un dato oggetto da misurare sia lungo 100 centimetri ed il nostro strumento di misura 10 centimetri. Per misurare l'oggetto dovremo riportare 10 volte la nostra unità di misura, ossia diremo che il corpo è lungo 100 centimetri. Ora, se nel movimento si contraggono sia il corpo che l'unità, poniamo di un decimo della loro lunghezza, avremo che il corpo sarà lungo 90 centimetri e l'unità 9 centimetri. In tal caso, se vogliamo misurare il corpo mediante il necessario riporto dell'unità, questa, contratta, dovrà essere riportata 10 volte sul corpo stesso e noi diremo ancòra che il corpo è lungo dieci volte l'unità di misura, cioè, apparentemente, 100 centimetri, poi che non ci è possibile di accorgerci dell'accorciamento dell'unità stessa.

(5) Il Fitz Gérald contemporaneamente al Lorentz emise la ipotesi della *reale* contrazione dei corpi, nel senso del loro moto.

(6) È autore di un'ottima trattazione scientifica della Teoria di Relatività (*Spazio, tempo, materia* - ed. Springer, Berlino).

Capitolo VIII

PRINCIPIO DI RELATIVITÀ PARTICOLARE DI ALBERTO EINSTEIN

Enunciati del principio di Relatività della Meccanica classica. — La esperienza Michelson-Morley, ammette anche un'altra interpretazione, oltre a quella che abbiamo esposta nel capitolo precedente, dovuta al Lorentz.

Ripensiamo al contenuto del principio di Relatività della Meccanica classica: *lo svolgimento di tutti i fenomeni meccanici è affatto indipendente dallo stato di quiete o dallo stato di moto rettilineo ed uniforme del sistema di coordinate al quale lo si riferisce.*

Ossia: *è assolutamente impossibile giungere, per mezzo di esperimentazioni esclusivamente meccaniche, a distinguere se ci si trovi in un sistema di coordinate in quiete, o pure in un sistema di coordinate in moto rettilineo ed uniforme.*

O pure anche: *in un sistema animato di un moto rettilineo ed uniforme i fenomeni meccanici si manifestano nello stesso modo che in un sistema allo stato di quiete.*

Le tre proposizioni precedenti, sono appunto tre diversi modi di enunciare il principio di Relatività della Meccanica classica. L'esperienza Mi-

chelson-Morley aveva posto in evidenza qualche cosa di molto simile, nei riguardi della propagazione della luce, quando si pensi che la luce si propaga su la Terra, in tutte le direzioni sempre con la stessa velocità. La Terra non si distingue punto, nei riguardi del fenomeno considerato, da un altro corpo del Mondo, posto nell'etere, allo stato di assoluta quiete.

Generalizzando il risultato si giunge alla conclusione che: *è impossibile di percepire il movimento della Terra esaminando i fenomeni di propagazione della luce;* e la stessa conclusione può trarsi anche dagli esperimenti di natura elettrica ed elettro-magnetica che vennero eseguiti a complemento dell'esperienza Michelson-Morley. Né pure con essi in nessun modo si riescì, durante brevi spazi di tempo, a stabilire che la Terra si muove, rispetto all'etere, con moto rettilineo ed uniforme.

Enunciato provvisorio del principio di Relatività particolare. — Si sarebbe quindi indotti a generalizzare il principio di Relatività della Meccanica classica ed a dargli la seguente forma provvisoria: *lo svolgimento di tutti i fenomeni naturali (cioè: meccanici, elettrici, magnetici, ed ottici) è sempre lo stesso, sia che lo si riferisca ad un sistema di coordinate allo stato di quiete, sia che lo si riferisca ad un sistema di coordinate, che, rispetto al primo, si muova con moto rettilineo ed uniforme.*

A questa conclusione giunse nel 1905 Alberto

Einstein (1) come conseguenza dei risultati dell'esperienza Michelson-Morley, ed essa costituisce ciò che si chiama oggi *principio di Relatività particolare.*

Alla enunciazione del principio di Relatività particolare si è giunti a traverso l'esame di dati sperimentali di fatto, e, per ciò, esso è nettamente distinto, da quello della Meccanica classica, dovuto unicamente a considerazioni teoriche.

Da tale principio classico risultava chiaro come le leggi fondamentali della Meccanica dovessero assumere la stessa forma, quale che fosse lo stato di quiete o di moto rettilineo ed uniforme del sistema di coordinate del quale ci servivamo per rappresentarle. E da ciò eravamo indotti a ritenere che il complesso dei fenomeni *meccanici* si sarebbe verificato in ambedue le specie di sistemi, con perfetta concordanza: l'esperienza ci aveva confermata la nostra conclusione.

Ora anche il principio di Relatività dell'Einstein ci è confermato dall'esperienza, poi che l'esperimentazione Michelson-Morley prova come abbiano lo stesso valore, sia il sistema di coordinate in quiete, sia quello in moto rettilineo ed uniforme, quandó li si adoperi per rappresentarci il fenomeno di propagazione della luce.

---

(1) Albert Einstein nacque ad Ulma nel Wurtemberg il 14 marzo 1879. Studiò a Monaco, a Aarau, a Zurigo. Insegnò a Zurigo e a Praga. È membro dell'*Accademia di Prussia per le Scienze* e dirige l'*Istituto Kaiser Wilhelm per il progresso delle scienze* dal 1914.

Il principio però evidentemente contraddice le nostre anteriori concezioni teoriche, poi che il risultato dell'esperimentazione Michelson-Morley ci appare completamente enigmatico. Noi dovremo quindi adoperarci a mettere d'accordo tutte le nostre considerazioni teoriche, nel nuovo aspetto assunto in seguito alla introduzione del principio di Relatività. Che una tale concordanza possa ottenersi è stato dimostrato appunto da Alberto Einstein; in ciò consistono i suoi meriti in vero immensamente grandi, nel campo della Scienza.

A base del nostro quadro del mondo avevamo sinora posto lo spazio allo stato di assoluta quiete, riempito in ogni suo punto dalla massa eterea. Un sistema di coordinate, il cui punto di origine giacesse in questo spazio, doveva nettamente distinguersi dal complesso degli altri sistemi in movimento, in quanto che in esso dovevano poter essere dimostrate come valide, in modo assoluto, le leggi della natura. A tale considerazione però, come sappiamo, soddisfa una infinità di sistemi di coordinate, e per ciò, sarebbe un «non-senso» il voler trarne uno, così a caso, tra tutti gli infiniti e considerarlo come il sistema allo stato di assoluto riposo.

Per quanto possa sembrarci difficile, non ci rimane altra via d'uscita, all'infuori di quella che ci conduca ad abbandonare definitivamente la nostra antica rappresentazione di spazio. Dobbiamo, senz'altro, non parlare più di spazio allo stato di quiete assoluta e di spazio allo stato di

moto, ma solamente di spazi in moto relativo ad altri.

Enunciato definitivo del principio di Relatività particolare. — Il movimento di uno spazio è, in sè e per sè, un concetto privo di senso, al quale non potremo dare alcuna definizione. Possiamo definire uno spazio in movimento soltanto in rapporto ad un altro spazio. Il quale per ciò può essere concepito allo stato di quiete; il primo allo stato di moto, relativamente all'altro.

Stabilito quanto precede si rende necessario l'abbandono della nostra provvisoria formulazione del principio di Relatività dell'Einstein, per sostituirla con la seguente definitiva: *Le leggi naturali che regolano lo svolgimento dei fenomeni naturali, sono del tutto indipendenti, quale che sia il sistema di coordinate scelto, per esprimerlo, tra due sistemi, l'uno dei quali si muova rispetto all'altro con moto rettilineo ed uniforme.*

La propagazione della luce. — La nostra attenzione deve essere ora rivolta a mutare le nostre primitive rappresentazioni del fenomeno di propagazione della luce, ponendolo in concordanza con i postulati del principio di Relatività.

A tal uopo dobbiamo sin d'ora chiarire quali premesse debbano essere soddisfatte affinchè la propagazione della luce in rapporto a due sistemi di coordinate, tali che l'uno si muova relativamente all'altro con moto rettilineo ed uniforme, avvenga con perfetta equivalenza. E anche in modo che nessuna

delle direzioni, nelle quali la luce potrebbe propagarsi, si distingua dalle altre, per una diversa velocità di propagazione della luce stessa, e che, in fine, si rispettino i risultati dell'esperienza Michelson-Morley.

Parecchi fatti rilevati dall'esperienza fisica ci costringono, inoltre, ad aggiungere un postulato, e cioè che: *la luce, nello spazio vuoto, si propaga sempre con una stessa velocità*, indipendentemente dal fatto che il corpo che emette la luce, sia in quiete nello spazio, o pure si muova, non importa con quale specie di moto.

Se consideriamo ora due sistemi di coordinate, che per brevità possiamo indicare con le due lettere O ed O', che si muovono, l'uno relativamente all'altro, con trajettoria rettilinea, e con velocità costante, di 100.000 chilometri al secondo, per quanto è detto nella proposizione enunciata, *un raggio di luce deve propagarsi in rapporto ai due sistemi di coordinate, sempre con la stessa velocità, quale che sia il sistema nel quale si trovi la sorgente luminosa.*

In quanto alla natura dei fenomeni di propagazione della luce, non vogliamo però emettere alcuna ipotesi. L'etere cosmico lo abbiamo ammesso, da prima, per poter in qualche modo guardare addentro nella vera essenza del fenomeno; non siamo mai riesciti a provarne la esistenza, e le sue ipotetiche qualità ci sono apparse sempre veramente strane. Non abbiamo in vero alcun motivo che ci incoraggi ad ammetterlo ancòra. In

ispecie se consideriamo, d'altro canto, che, propagandosi la luce anche nello spazio vuoto, l'ammissione dell'esistenza dell'etere è assolutamente superflua.

Conseguenze della Relatività.

Consideriamo ora quali conseguenze derivino dall'ammissione sia del principio di Relatività dell'Einstein, sia della costanza della velocità della luce, nello spazio vuoto.

Se vogliamo determinare questa velocità nel sistema di coordinate O — il che significa: se vogliamo stabilire il percorso della luce, in un secondo, nel sistema O — dobbiamo, da prima, scegliere due punti A e B la cui posizione sia individuata nel sistema O; la distanza reciproca tra i due punti ci è nota. Poscia dobbiamo stabilire il tempo che la luce impiega a percorrere il tratto AB. Ciò potremo fare molto semplicemente: inviando da A un raggio verso B, ed osservando in quanto tempo esso giunga precisamente in B. A tal uopo ci serviremo di due orologi, perfettamente uguali nel ritmo e nella posizione delle sfere.

a) *Simultaneità nel Tempo e nello Spazio.* — Possiamo senz'altro ammettere l'uguaglianza del ritmo; ma come potremo ottenere una uguale posizione delle sfere, se un orologio si trova in A e l'altro in B? Potrebbe sembrare molto semplice: portare l'orologio da B in A, regolarlo con quello in A, e riportarlo in B.

È certamente possibile ottenere una uguaglianza di indicazione dei due orologi, quando si trovino entrambi in A, poi che possiamo benissimo ammettere la simultaneità di due avvenimenti nello stesso luogo. Ma se, effettuata la regolarizzazione, uno dei due orologi si riporti in B, per ammettere l'uguaglianza delle indicazioni delle

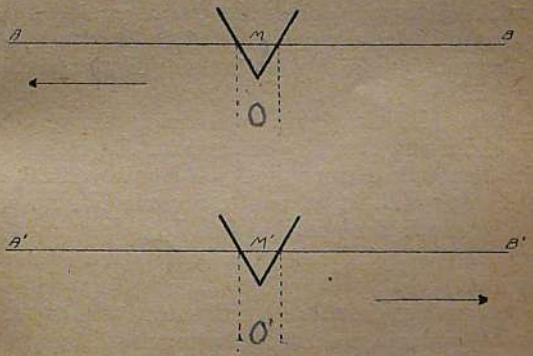

Fig. 10.

sfere, anche dopo tale trasporto, implicitamente dobbiamo ammettere che il movimento compiuto da uno dei due orologi, per tornare da A in B non influisca affatto su le indicazioni delle due sfere. Ma al riguardo non sappiamo nulla di preciso, e per ciò preferiamo, evitando tale premessa, di cercare di raggiungere la condizione di uguaglianza delle indicazioni, senza spostare dal rispettivo punto i due orologi.

Il principio di Relatività, secondo il quale la luce deve propagarsi in rapporto al sistema O, con velocità sempre uguale, in tutte le direzioni, ci viene in aiuto nella nostra ricerca.

Misuriamo da prima la distanza fra i due punti A e B, riportando l'unità di misura — possiamo assumere un chilometro — lungo il tratto AB, tante volte quante occorre, partendo da A, per giungere in B. Il numero delle volte che avremo dovuto riportare la detta unità, ci esprime la misura della distanza. Questa sarà esattamente di 300.000 chilometri.

Determiniamo poscia — il che è sempre possibile, con una semplice costruzione che ci insegna la Geometria elementare — il punto centrale M del tratto AB. In tal punto, come indica la figura 10, poniamo due specchi in modo da poter vedere in essi, simultaneamente, la imagine dei due punti A e B.

Incarichiamo inoltre una persona che si trova in A di inviare verso B un raggio di luce, nell'istante preciso in cui l'orologio in A segna esattamente le 12, e una posta in B di inviare un raggio verso A, nell'istante preciso in cui anche l'orologio in B segna esattamente le 12. Poi che il punto centrale M dista egualmente, sia da A che da B, e, in modo preciso, di 150.000 chilometri e poi che la luce, secondo il principio di Relatività, si propaga con velocità uguale tanto da A verso M, che da B verso M, noi dobbiamo veder giungere contemporaneamente i due raggi di luce, nell'istante in cui le sfere degli oro-

logi, in A ed in B, hanno la stessa posizione. Se ciò non avvenga potremo sempre far correggere dalla persona che si trova in B la posizione delle sfere del rispettivo orologio, insino a che possa raggiungersi il voluto arrivo contemporaneo in M dei due raggi inviati da A e da B. In tal modo siamo sicuri che le sfere di ambedue gli orologi, in A e in B, hanno effettivamente la stessa posizione.

Ultimate così le operazioni preliminari ora descritte, possiamo procedere alla vera misura della velocità della luce. Daremo alle due persone poste in A e in B le seguenti istruzioni: far partire da A verso B, alle 12 precise, un raggio di luce; esaminare in B a che ora vi giunge detto raggio.

Nella nostra esperienza il raggio di luce giungerà in B esattamente alle 12 e un secondo, cioè la velocità della luce è precisamente di 300.000 chilometri al secondo.

Uguale procedimento dobbiamo seguire se, trovandoci nel secondo sistema O' vogliamo anche in questo procedere alla misura della velocità della luce, cioè dobbiamo scegliervi due punti A', B', misurare la grandezza del segmento che unisce questi due punti, in chilometri, riportando, come si è detto per il sistema O la unità di misura, e costruendo quindi il punto centrale M' nel tratto $A'B'$. Nei punti A' e B' poniamo due orologi, che abbiano le stesse precise qualità e facciamo regolare da due persone la posizione delle sfere, nel modo descritto. Il metodo, del quale sinora abbiamo trattato, deve essere, anche per questa seconda esperienza, valido, poi che, in obbedienza

al principio di Relatività, la luce deve propagarsi in tutte le direzioni con la stessa velocità, anche rispetto al sistema di coordinate O'.

Non appena gli orologi saranno regolati, potremo, come già nella prima esperienza, determinare esattamente la velocità della luce, e dovremo trovare come risultato, che la luce percorre in un secondo 300.000 chilometri.

Sin qui tutto ha proceduto in perfetto ordine; ma può venirci il desiderio di complicare l'esperienza, molto semplice, in cerca di risultati, diremo così, più istruttivi che non quelli prima ottenuti.

A tal uopo: inviamo nel sistema O un osservatore, che si porti nel punto M ed abbia l'aiuto di due persone, poste nei punti A e B, ed un altro osservatore nel sistema O' che si ponga innanzi agli specchi M' ed abbia anch'esso due persone che lo coadiuvino, poste nei punti A' e B', che osservino i rispettivi orologi.

Constatiamo un po' quel che avviene.

(Per semplicità di linguaggio in vece di dire «osservatore posto in O» useremo il simbolo O_0, e, parimenti, per dire «osservatore posto in O'» il simbolo O'_0).

Per O_0 il sistema O è in quiete, mentre il sistema O' si muove. Per O'_0 il sistema O' è in quiete e quello O è in moto: entrambe le concezioni sono perfettamente equivalenti per la Relatività del concetto di movimento.

Dopo che O_0 abbia ottenuta, per mezzo dei suoi

coadiutori, la regolazione degli orologi, nel modo già noto, e dopo che abbia date le necessarie disposizioni, pure note, egli constaterà il simultaneo lampeggiare dei segnali luminosi inviati da A e da B, come pure la simultaneità delle indicazioni delle sfere dell'orologio. Ma errerebbe chi ritenesse che anche O'_o giunga agli stessi risultati. Per O'_o il sistema O è in moto rettilineo ed uniforme, rispetto al sistema O' e, precisamente, la sua direzione sia quella $B'\ A'$ (indicata dalla freccia superiore nella figura 10). Per ciò il sistema di specchi posti in M si muove in senso opposto a quello del raggio di luce proveniente da A. Siccome la velocità del raggio di luce deve esser sempre la stessa, sia per rapporto ad O' che per rapporto ad O, il raggio per O'_o deve giungere in M prima che quello emesso da B, per il che — sempre secondo il giudizio di O'_o — il sistema di specchi in M deve spostarsi.

Conseguentemente O'_o deve veder apparire nello specchio in M, prima il raggio di luce inviato da A e sensibilmente molto più tardi, il raggio proveniente da B. O'_o per ciò deve logicamente asserire che è impossibile che le sfere dei due orologi di O_o avessero la stessa posizione. O_o giudicherà precisamente lo stesso per gli orologi di O'_o, quando, secondo O'_o, siano portati ad una eguale indicazione di sfere. Poi che per O_o il sistema di specchi in M' si muove nel senso di A verso B (vedi freccia inferiore della figura 10), per O_o il raggio di luce emesso nel sistema O dal punto B, raggiunge lo specchio in M' prima di quello inviato dal punto O'.

Si è per ciò che O'_o, in base alle sue osservazioni, asserisce che le stere degli orologi in A' e B' hanno la stessa posizione, ed O_o asserisce, in base alle sue osservazioni, che le loro posizioni sono diverse. In altre parole: gli stessi due avvenimenti e, cioè, l'accensione di un segnale luminoso nei punti A' e B' del sistema O' che sono chiamati *simultanei* da O'_o saranno chiamati da O_o, in base alle sue osservazioni, *non simultanee*, e viceversa, due avvenimenti (cioè l'accensione di un segnale luminoso nei punti A e B nel sistema O) percepiti in tempi diversi da O'_o sono concepiti nello stesso istante da O_o che, per ciò, li chiamerà *simultanei*.

Ci eravamo proposti di porre in evidenza le conseguenze che potrebbero trarsi dalla validità del principio della costanza della velocità della luce nello spazio vuoto. Abbiamo dovuto rinunziare al concetto di simultaneità in sè, per non incorrere in un « non-senso ». Così anche il concetto di simultaneità deve essere relativizzato, ed espresso come segue: *se due dati avvenimenti riferiti ad un sistema, si svolgono in tempo eguale per rapporto al sistema stesso, cioè sono* simultanei, *non possono considerarsi ancora come tali, quando li si riferisca ad un altro sistema, che si muova rispetto al primo.*

b) *Relatività del Tempo.* — Ciò chiarito torniamo a considerare i due osservatori O_o e O'_o nei loro rispettivi sistemi. Se O_o invia da A verso B un raggio di luce, questo, secondo il principio di Relatività, percorrerà la distanza AB nello stesso

tempo che impiegherebbe a percorrerla in senso contrario, cioè da B verso A, e precisamente in un secondo. Questo vale però solo per O_0, e per gli altri osservatori che con lui si trovano nel sistema O, mentre O'_0, dal suo sistema O', giudicherà il fenomeno del tutto diversamente. Infatti, se nel momento in cui i due orologi A ed A' segnano le 12, O'_0 invia un raggio verso B, questo, rispetto al punto B', giunge appunto in B quando i due detti orologi segneranno le 12 ed un secondo. Ma il punto B corre incontro al raggio di luce, poi che l'intiero sistema O si muove relativamente al sistema O' nel senso di B verso A; per ciò l'orologio in B' nel momento in cui il raggio di luce giunge in B, segnerà le 12 ed una frazione di minuto secondo, per modo che per O'_0 la luce percorre il cammino da A in B, cioè nel sistema O, in meno di un secondo, ed il raggio di luce inviato da O_0, secondo il giudizio di O'_0, impiegherà a giungere da B in A più di un secondo.

Da ciò si vede come debba relativizzarsi non soltanto il concetto di simultaneità, sì bene anche quello della durata del tempo. Infatti se due fenomeni, come nel caso nostro, la propagazione della luce da A verso B, e da B verso A, hanno la stessa durata, se riferiti ad un determinato sistema di coordinate, quando li si riferisca ad un sistema, che si muova rispetto al primo, si giudica che abbiano una diversa durata. La durata di tempo, in sè e per sè, per tal motivo, non ha alcun significato e, però, d'ora innanzi, *nelle indicazioni*

di tempo dovremo sempre precisare il sistema di coordinate nel quale la misura del tempo è stata eseguita; solo quando si conosca tale sistema di coordinate, noi possiamo giudicare esattamente la indicazione relativa della durata.

Ma ancòra una conclusione può trarsi dall'ammettere la validità del principio di Relatività dell'Einstein.

c) *Relatività dello Spazio.* — Come si è detto O_0 può misurare la lunghezza del tratto AB allo stato di quiete, riportando un dato numero di volte una misura unitaria di un chilometro e, precisamente, 300 volte, in modo da giungere alla conclusione che il tratto è lungo 300.000 chilometri.

Voglia ora O'_0 misurare la stessa lunghezza: a tale scopo, in un istante, perfettamente determinato, O'_0 individui nel proprio sistema O' i due punti che, nell'istante stesso, stanno di fronte ai due punti A e B, e ne misuri la distanza nel proprio sistema: il risultato deve rappresentare la lunghezza del tratto AB. Si potrebbe pensare, da prima, che le due misurazioni della stessa distanza AB conducano ad uno stesso risultato, poi che nella nostra vita quotidiana, non pensiamo né pure in sogno che di uno stesso oggetto misurato da due persone, sia pure in momenti diversi, sia pure con maggiore o minore lentezza, quali che siano insomma le condizioni in cui le misurazioni avvengano, si possano avere, anche adoperando, per maggior sicu-

rezza, uno stesso istrumento di misura, misure non uguali.

Pure i risultati debbono essere diversi e la trattazione matematica del problema, ce lo dice in modo chiaro e sicuro. Basterà qui riportare il risultato del calcolo trascurandone lo svolgimento: *la lunghezza di una determinata distanza è apprezzata diversamente a seconda che la misurazione ne sia fatta in un sistema di coordinate allo stato di quiete relativamente alla distanza stessa, o pure in un altro sistema, che si muova rispetto al primo.*

I principii fondamentali dell'Einstein. — Compendiamo le considerazioni sinora fatte. Alberto Einstein nel 1905, spintovi dai risultati dell'esperienza Michelson-Morley, formulò i seguenti principî:

1.° *Principio di Relatività:* le leggi che regolano lo svolgimento dei fenomeni fisici, non mutano se i fenomeni stessi si riferiscano ora ad uno ora ad un altro sistema di coordinate che si muova, rispetto al primo, con moto rettilineo ed uniforme e viceversa.

2.° *Principio della costante velocità della luce:* se un corpo emette un raggio di luce, la velocità di questo raggio nello spazio vuoto è sempre la stessa, tanto se il corpo che lo emette si trova in quiete, quanto se si trovi in moto.

Partendo dai due principî noi siamo giunti alle seguenti conclusioni:

1.ª La condizione di simultaneità verificata

tra due avvenimenti riferiti ad un determinato sistema di coordinate, non si verifica più quando gli stessi avvenimenti si riferiscano ad un altro sistema di coordinate in moto rettilineo ed uniforme, rispetto al primo.

2.ª L'intervallo di tempo tra due determinati avvenimenti è valutato diversamente a seconda che sia riferito ad un sistema di coordinate o ad un altro, che, rispetto al primo, sia in moto.

3.ª La distanza nello spazio fra due punti determinati è valutata diversamente a seconda che sia riferita ad un sistema di coordinate o ad un altro sistema che rispetto ad esso sia in moto.

Le formule dell'Einstein. — Ciò premesso vien fatto di domandare quali più precise relazioni esistano tra i dati di tempo e di lunghezza, ottenuti da due sistemi di coordinate, l'uno in moto rispetto all'altro, con una determinata velocità.

Tali relazioni si deducono con procedimenti di calcolo. Basterà, perchè possiamo farcene un'idea, ricordare quanto è stato detto circa l'etere cosmico, nei riguardi della propagazione della luce, riferita ad un sistema di coordinate strettamente solidale con la Terra: siamo stati condotti a concludere che la luce si propaga nella direzione del movimento della Terra e nello stesso senso, con una velocità che ci è data da quella con cui essa si propaga nello spazio vuoto, diminuita della velocità della Terra, e dalla stessa velocità aumentata, in vece, della velocità della Terra, quando la luce si propaghi nel senso opposto al movimento della Terra, sem-

pre nella sua direzione. A tale conclusione siamo giunti per aver fatte implicitamente due premesse fondamentali, cioè:

1.ª la misura di un intervallo di tempo è la stessa sia per lo spazio allo stato di quiete, sia che per la Terra in movimento;

2.ª la distanza tra due punti di un corpo rigido è la stessa sia nello spazio vuoto, che nella Terra in movimento.

Ma ora abbiamo riconosciuto come le due premesse siano inammissibili, e che, anzi, sia l'intervallo di tempo tra due avvenimenti, sia la distanza spaziale di due punti di un corpo rigido dipendono dallo stato di moto del sistema di coordinate al quale si riferiscono le grandezze misurate. Per ciò se misuriamo su la Terra la velocità della luce, per effetto del movimento della Terra, relativo allo spazio allo stato di quiete, giungiamo a risultati diversi, cioè a valori di tempo e di lunghezze diversi da quelli ai quali giungeremmo considerando lo spazio allo stato di quiete. Siccome deve verificarsi la costanza della velocità della luce in tutte le direzioni, così s offre la possibilità di calcolare le relazioni cercate, per i tempi e le lunghezze, basandole su due sistemi di coordinate l'uno in moto rispetto all'altro. I calcoli necessarî furono eseguiti dall'Einstein, e condussero a talune formule matematiche, che, ad esempio, ci permettono di calcolare su la base delle misure di lunghezza e di tempo, trovate nel sistema O, le corrispondenti misure nel sistema O'.

Altre conseguenze della Relatività.

a) *Durata del Tempo.* — Consideriamo alcuni casi per farci una idea esatta dei risultati ai quali si giunge con le formule dell'Einstein.

Riportiamoci all'uopo ancòra all'esempio dei due sistemi O e O'. Se O_0 ponga in un punto qualsiasi del sistema O un orologio che batta i secondi, O'_0 nel sistema O' non potrà mai dire che tale orologio batta appunto i secondi, poi che per O'_0 l'orologio si muove insieme con O_0 e con l'intero sistema O.

Secondo le formule dell'Einstein, il ritmo dell'orologio appare ritardato ad O'_0.

Se poniamo un orologio, che batta i secondi, in O' allo stato di quiete, questo, per O'_0, avrà un ritmo più rapido che non l'orologio di O_0, ed in vece O_0 giudicherà che l'orologio di O'_0 ha un ritmo più lento che non quello in O_0. Ciò è per il fatto che, per O_0, l'orologio di O'_0 trovasi allo stato di moto, mentre il proprio è allo stato di quiete, e anche perchè un orologio allo stato moto, ha un ritmo più lento, che non quello di un orologio del tutto uguale, ma allo stato di quiete. In tal modo si vede come i giudizi dei due osservatori siano l'uno l'opposto dell'altro. Il chiedere quale sia il giudizio esatto, sarebbe fuori luogo.

La durata del tempo di un qualsiasi avvenimento è qualche cosa di assolutamente soggettivo: un osservatore può ritenere il ritmo di un oro-

logio più lento che non un altro, e viceversa. Fra le due asserzioni non vi è affatto contraddizione, come non ve ne sarebbe tra l'affermazione di O_0 circa lo stato di quiete del sistema O e circa lo stato di moto del sistema O', e la affermazione di O'_0 circa lo stato di quiete del sistema O' e lo stato di moto del sistema O. E ciò perchè, secondo il principio di Relatività dell'Einstein, sono relativi non soltanto i concetti di quiete e di movimento, ma peranco quello della durata del tempo.

Dopo quanto si è detto appare ora indubbiamente chiaro perchè non effettuassimo — come sembrava doversi fare — la regolazione delle sfere degli orologi, ponendo questi l'uno accanto all'altro, uguagliando la posizione delle sfere e riportando poscia l'uno degli orologi nel punto destinatogli. Infatti, il movimento dell'orologio avrebbe rallentato il suo ritmo, precisamente in proporzione della velocità del movimento, e le sfere, da prima in un'eguale posizione, non lo sarebbero più state, quando uno degli orologi fosse stato riportato al punto assegnatogli. Per ciò abbiamo regolato le lancette con l'ausilio dei raggi di luce, tenendo fermi gli orologi.

b) *Lunghezze.*

Abbiamo proceduto alla misura della velocità della luce, misurando da prima nei sistemi O e O' rispettivamente i tratti AB e $A'B'$, che dovevano ambedue coincidere nel senso del movimento opposto a quello dei due sistemi. In entrambi i sistemi i due tratti AB, dovevano esser

lunghi 300.000 chilometri, per ciascuno degli osservatori, rispetto al proprio sistema. Siccome per O_o il tratto AB si trova allo stato di quiete, ed il tratto $A'B'$ allo stato di moto, così egli, in conseguenza delle formule dell'Einstein, giunge alla conclusione che il tratto $A'B'$ è più corto del tratto AB, e viceversa; ad $O'o$ il tratto AB sembrerà più corto del tratto $A'B'$, poi che per detto osservatore $A'B'$ trovasi allo stato di quiete, ed AB allo stato di moto. Né pure in tal caso è lecito chiedersi quale sia la vera lunghezza dei tratti AB ed $A'B'$, poi che i risultati di una qualsiasi misurazione di lunghezza dipendono sempre dallo stato di moto dei tratti stessi rispetto al sistema di riferimento prescelto. Così anche il concetto di lunghezza di un corpo è del tutto relativo.

c) *La invariabilità delle dimensioni nella direzione normale del moto.* — Fino ad ora il tratto AB si trovava esattamente nella direzione del moto dei due sistemi di coordinate O ed O'; ma se, gradatamente, si allontani il tratto stesso dalla detta direzione, lasciando invariata la direzione primitiva del moto dei due sistemi — il tratto AB per O_o conserva immutata la sua lunghezza mentre per O'_o appare accorciato di tanto meno rispetto al tratto $A'B'$, di quanto lo si allontana dalla posizione primitiva. La misurazione del tratto AB eseguita da $O'o$, dà, per ciò un valore che sempre più si avvicina a quello fornito da O_o.

Nel momento in cui il tratto AB viene a trovarsi

perpendicolarmente alla direzione comune dei sistemi O e O', le misurazioni delle lunghezze dei due

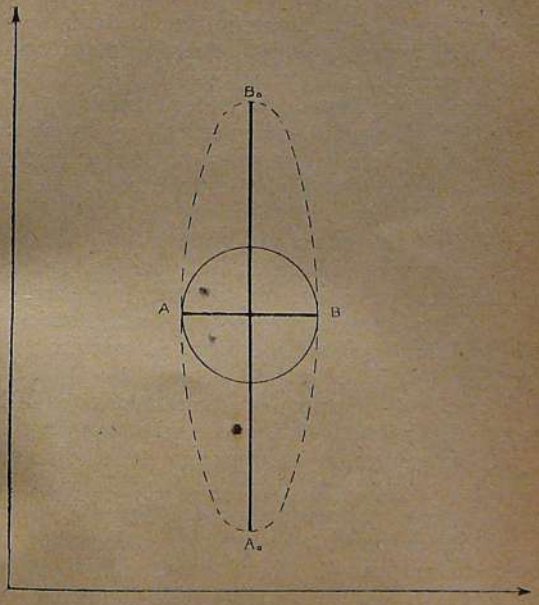

Fig. 11.

tratti $A'B'$ e AB conducono ad uno stesso risultato (figura 11).

Se facciamo ancòra ruotare, sempre nella stessa direzione, il tratto AB, i risultati delle misurazioni cesseranno dall'essere eguali, ed a mano a mano

che la rotazione procede, O'_0 rileverà un accorciamento sempre maggiore, rispetto alla lunghezza misurata da O_0. Allorchè il tratto AB ritorni, capovolto, nella direzione primitiva, le due misurazioni differiranno di quanto differivano prima di iniziare la rotazione. Quanto si è detto vale qualora anzi che far ruotare AB, si faccia ruotare $A'B'$. I risultati ai quali siamo giunti ci conducono ad un'altra conclusione, interessantissima e financo, a prima vista, incredibile, tanto è sorprendente.

d) *Deformazione della figura dei corpi.* — Se l'osservatore del sistema O disegna, nel sistema stesso, un circolo con un raggio a piacere, ed il cui centro sia in un punto qualsiasi del sistema, O'_0 non giudicherà che la figura disegnata sia un cerchio.

Il cerchio — è noto — è caratterizzato dalla proprietà che tutti i suoi punti distano ugualmente dal centro. Se si tracciano tanti diametri quanti si voglia, essi, rispetto a quello parallelo alla direzione del movimento del sistema, riprodurranno esattamente le condizioni che abbiamo descritte nell'esempio dianzi dato, quando allontanavamo il segmento AB dalla direzione del movimento del suo sistema. Tutti i diametri non avranno per O'_0, il cui sistema è in moto rispetto ad O, la stessa lunghezza; ma, non come nell'esempio citato le successive posizioni del segmento AB, a mano a mano che egli considererà diametri passanti per i punti del contorno del cerchio, li troverà sempre meno corti, cioè più lunghi

di quanto non gli appaia il diametro che si trova nella direzione del movimento del sistema O' rispetto ad O, fino a che non giunga al diametro perpendicolare a questa direzione che gli apparirà lungo quanto appare all'osservatore O_o del sistema fermo.

Per effetto della variazione della lunghezza dei diametri, la figura disegnata da O_o apparirà così come un ellissi il cui asse minore (figura 11) è parallelo alla direzione del movimento del sistema O' e il cui asse maggiore è, in vece, perpendicolare alla direzione stessa. Analogamente: se O'_o disegnasse un circolo nel proprio sistema esso apparirebbe a O_o come un ellissi.

Quel che si è detto per il circolo vale per tutte le altre superficie e per tutti gli altri corpi; con ciò *il concetto di forma e di figura dei corpi diventa un concetto relativo*, che acquista senso solo quando lo si riferisca ad un determinato sistema di coordinate.

Una velocità limite. — Dalle formule dell'Einstein risulta anche che l'accorciamento della lunghezza di un segmento aumenta con il crescere della velocità relativa del segmento stesso rispetto al sistema di coordinate usato. Da esse si trae la conseguenza che, se un dato segmento si muovesse rispetto al suo sistema con la velocità di propagazione della luce, la lunghezza del segmento stesso si ridurrebbe a zero. Da ciò, e da altre considerazioni complementari, che qui non vogliamo ripetere, si giunge alla conclusione, in vero molto

importante, che secondo le teorie dell'Einstein, la velocità della luce è una velocità limite che non può essere mai raggiunta, e tanto meno superata (2).

Le ipotesi del Lorentz e la teoria dell'Einstein. — Quando abbiamo parlato per la prima volta dell'esito negativo dell'esperienza Michelson-Morley (infatti gli esperimentatori non

(2) I raggi Becquerel, i raggi β che vengono emessi nei tubi ad aria rarefatta, nei tubi Crookes, estremamente veloci, hanno una velocità di 270.000 chilometri al secondo. Mette conto di chiarire il perchè la velocità della luce possa ritenersi come una *velocità-limite* che, in certo qual modo, come nota l'astronomo di Parigi Charles Nordmann può accoppiarsi con la temperatura dello *zero assoluto*, — 273 gradi, alla quale la materia, priva di energia, priva di vita, non esisterebbe più, o meglio, allo stato attuale delle conoscenze noi non sapremmo concepire la materia a tale temperatura.

La teoria della Relatività, però, conduce ad ammettere — lo dico per incidenza — che un grammo di materia per un osservatore in quiete abbia una energia interna pari a quella posseduta da 3 milioni di chilogrammi di carbon fossile.

Riprendiamo la formula che abbiamo riportata nella nota riguardante la *contrazione* del Lorentz:

$$l' = l\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}$$

Se v diventasse uguale o maggiore di V l'espressione sotto il segno di radice diventerebbe zero o negativa; in ogni caso la radice non avrebbe alcun senso pensando che il suo valore deve essere riferito ad un corpo solido. Di qui la impossibilità di concepire che la velocità della luce possa essere raggiunta o superata. È questa una dimostrazione « per assurdo » che può valere.

riuscirono a provare quel che volevano) (3), accennammo all'ipotesi della contrazione con la quale il fisico olandese Lorentz cercò di interpretare l'esperienza stessa. Secondo tale ipotesi un corpo muoventesi nell'etere cosmico, allo stato di quiete, doveva contrarsi, cioè raccorciarsi nella direzione del suo moto. Anche nella teoria dell'Einstein ricorre questo accorciamento e inoltre della stessa grandezza numerica. Ma tra l'accorciamento del Lorentz e quello dell'Einstein, esiste una differenza sostanziale che non possiamo assolutamente tacere e cioè: mentre *il raccorciamento del Lorentz è una proprietà fondamentale della materia in sè, quello dell'Einstein non è se non una conseguenza logica dei metodi di misura delle lunghezze da noi eseguite.*

In altre parole: la relatività delle lunghezze è dovuta solo ai metodi di misura, e per nulla alla proprietà della materia in sè, sì che non è necessario ascrivere alla materia speciali qualità che giustifichino gli accorciamenti, qualità che in vece sono intimamente legate all'accorciamento del Lorentz per l'ammissione del quale si rende necessaria la ricerca di quelle proprietà.

Come si è più volte rilevato nel corso delle nostre esposizioni, le formule dell'Einstein trassero la loro origine soltanto dal bisogno di spiegare, senza ricorrere a gratuite quanto — probabilmente — strane ipotesi, il risultato dell'esperimentazione Michel-

---

(3) L'Einstein ritenne che l'esito fosse negativo non per imperfezioni degli apparecchi od errori di valutazione e di calcolo sì bene per *necessità fisiche* del fenomeno.

son-Morley, che non si sarebbe riesciti a spiegare partendo dalle antiche concezioni fisiche.

Ma se il solo valore delle formule dell'Einstein, e con esse della intera teoria, dovessero valere solo per spiegare l'esperimentazione Michelson-Morley, in vero la scienza fisica non potrebbe rassegnarsi al sacrifizio delle antiche concezioni, sacrifizio che la teoria dell'Einstein esige nel modo più assoluto.

Valore del principio di Relatività. Conclusione. — Vi è tutta una serie di fenomeni con i quali si riesce a provare la validità delle formule dell'Einstein. Ma la conoscenza di esse richiede estese cognizioni fisiche e matematiche. Rinunciamo per ciò ad esporle, ma affermiamo che le asserzioni fondamentali dell'Einstein ebbero assoluta conferma nei risultati delle esperienze acconciamente istituite. Se la possibilità di esaminare sperimentalmente il principio di Relatività, costituisce già di per sè un grande vantaggio, che molte delle teorie costrutte sino ad oggi non poterono avere, il fatto che quest'esame abbia condotto a risultati che coincidono con quelli nei quali culmina la teoria, è un altro vantaggio di gran lunga più importante, e giustifica il valore che si attribuisce alla teoria einsteiniana.

L'uomo è di per sè misoneista. Il nuovo lo spaurisce, e per ciò, il mutare le concezioni alle quali era adusato, con altre concezioni del tutto diverse dalle prime, rappresenta per lui una difficoltà che

può anche sembrare insormontabile. Il che si verifica per tutti quelli che prendon contatto con le teorie einsteiniane. E bisogna per ciò che il passaggio dalle une alle altre avvenga gradatamente.

Il nostro quadro del mondo l'Einstein lo scuote sin nelle più profonde radici (4). Deve sparire l'assunzione di uno spazio immobile assoluto, quella vasca senza limiti, riempita d'etere, nel quale dovrebbe svolgersi la innumere vita della natura. Deve sparire la assunzione di un tempo immutabile vero, che si è fatta sin qui nella valutazione di tutti i fenomeni.

La distanza nello spazio, cioè l'intervallo nello spazio, l'intervallo nel tempo, sono legati a concetti privi di senso, come il concetto di corpo rigido, come la simultaneità di due avvenimenti. Tutti questi concetti li si deve relativizzare.

Essi assumono tutti un significato determinato, possibile anche dopo le più acute investigazioni logiche, soltanto quando sia dato il sistema di coordinate al quale i concetti stessi devono riferirsi.

Hermann Weyl, ha illustrato con un esempio molto efficace, e in pari tempo, mirabolante, questa necessità di fatto. La vita di un uomo può essere rassomigliata al moto di un orologio. Il suo svolgersi per ciò dipende dallo stato di moto del sistema

(4) A tal riguardo non bisogna volare scompostamente con la fantasia. — Se è vero che la teoria einsteiniana è una teoria rivoluzionaria, è per anco vero che le leggi della meccanica classica non son per ciò destituite di fondamento, ma diventano solo casi particolari di leggi più generali, formulate appunto dall'Einstein.

di coordinate sul quale quell'uomo vive. Immaginiamo due fratelli gemelli che, un bel giorno, si separino. L'uno rimane in patria (cioè in un acconcio sistema di coordinate, sempre allo stato di quiete) e l'altro emigri (cioè si muova relativamente alla patria con la maggiore velocità possibile): quando questo ritorni, dopo molti anni, in patria, rispetto al fratello rimasto fermo, apparirà molto più giovane.

Capitolo IX

IL MONDO TETRA-DIMENSIONALE

Le forme geometriche. — Come è noto lo *spazio* è una forma geometrica che si estende in tre direzioni, e cioè ha tre dimensioni: lunghezza, larghezza ed altezza, a differenza delle superficie che ne hanno due: lunghezza e larghezza, delle *linee* che ne hanno una: lunghezza, dei *punti* che non ne hanno alcuna.

Se ammettiamo come intuitivo il concetto di punto matematico, lo spazio, le superficie, le linee possono concepirsi come « insieme » di un numero illimitato di punti, la cui posizione reciproca risulta definita da leggi diverse, rispettivamente per lo spazio, per le superficie, per le linee. Ad esempio, la legge che determina la posizione dei punti costituenti una linea retta è essenzialmente diversa da quella che determina la posizione dei punti costituenti una linea curva; diversa da entrambe è la legge che determina la posizione dei punti costituenti una qualsiasi superficie.

Tutti questi « insieme » di punti hanno però, in comune, una proprietà, e cioè che: *se in un « insieme » determinato si passa da un punto qualsiasi al punto immediatamente vicino, questo appartiene sempre all' « insieme » considerato.*

Il CONTINUO *matematico.* — Ogni «insieme» del genere di quelli considerati costituisce una serie ininterrotta di punti; ogni punto si unisce immediatamente al precedente così come al seguente; tra due punti successivi, non esistono interspazi liberi, non v'è, cioè, alcuna « soluzione di continuità ». Questa proprietà, molto importante, che noi abbiamo espressa sotto diverse forme equivalenti, è certo nota a tutti i lettori, non foss'altro inconsapevolmente; così pure è noto che la retta è un « insieme » continuo di un numero illimitato di punti.

Da ciò si giunge a comprendere, senza dubbio, che cosa intenda dire il matematico quando definisce una retta come un CONTINUO. Come pure si comprende che in tale senso anche ogni superficie, e pur anco lo spazio, sia un CONTINUO, se bene — come suggerisce l'intuizione — il CONTINUO linea sia di natura diversa da ciascuno dei CONTINUI superficie e spazio. In fatti, mentre in una linea è possibile passare da un punto del CONTINUO ad un altro in due sensi soltanto, cioè avanti e dietro, per una superficie e per lo spazio il passaggio avviene senza tale restrizione. Per giungere da un determinato punto del CONTINUO superficie ad un altro punto di esso vi è un numero di modi possibili illimitato.

Le linee, evidentemente, sono i più semplici CONTINUI, caratterizzati, appunto, dal fatto che il passaggio da punto a punto è possibile solo in due sensi: ciascun CONTINUO di tal genere si chiama CONTINUO *mono-dimensionale.* Qualsiasi linea, per ciò, è un CONTINUO *mono-dimensionale.*

La lunga parola insueta non deve spaventarci, poi che il suo significato è semplice. Il suo uso è consigliato da ragioni di comodità: quando se ne comprenda il senso, ben si vede come essa esprima, nel più semplice modo possibile, il risultato di molte considerazioni che essa stessa può automaticamente richiamare alla memoria. Dovremo altra volta servirci di parole simili che potremo chiamare « parole sintetiche »; il ricorrervi è giustificato dalla necessità di condensare — cioè sintetizzare — in una parola, il risultato di lunghe e faticose distinzioni, per brevità di esposizione, sì da aiutare, nel miglior modo possibile, la nostra memoria.

Definito così il CONTINUO mono-dimensionale con le proprietà caratteristiche dell'« insieme » di punti costituenti una linea, possiamo facilmente concepire altri CONTINUI: le superficie, lo spazio.

Consideriamo da prima un piano, la cui immagine ci è offerta dalla superficie di un tavolo. Quali elementi costitutivi di tale CONTINUO, possiamo assumere, anzi che punti, rette giacenti l'una accanto all'altra, sì da costituire un « insieme » continuo, cioè senza soluzione di continuità, così come i punti in una linea. Con tale concezione il *piano rappresenta un* CONTINUO *mono-dimensionale di linee*, poichè possiamo passare da una linea determinata di esso ad una successiva, muovendoci in due sensi, cioè: avanti e dietro. Ma possiamo considerare il piano anche come un CONTINUO di punti; con ciò il piano può essere definito come un

CONTINUO *bi-dimensionale*, poi che rappresenta un CONTINUO mono-dimensionale di CONTINUI, alla loro volta, mono-dimensionali.

Quanto si è detto può estendersi a tutte le superficie; qualche esempio basterà a chiarirci la cosa.

Si comprende come la *circonferenza*, cioè la linea di contorno di un *circolo*, sia un CONTINUO mono-dimensionale. Imaginiamo un numero grandissimo di circonferenze *tutte eguali*, poste senza interruzione l'una successivamente e accanto all'altra, — il che possiamo imaginare si ottenga innestando sur uno stesso asse moltissime ruote, uguali. Otteniamo in tal modo una superficie: precisamente quella che si chiama *superficie cilindrica*. Essa può considerarsi come un CONTINUO costituito di CONTINUI mono-dimensionali, cioè come un CONTINUO bi-dimensionale.

Se le circonferenze, anzi che essere tutte eguali, sono tutte diverse, ma tali che il loro diametro decresce, in misura determinata da una certa legge fino ad annullarsi, cioè sino a che una circonferenza è confondibile con un punto, otteniamo non più una superficie cilindrica, ma la superficie di una mezza sfera, cioè di una *emisfera*. Due di tali superficie, perfettamente uguali, delle quali sian fatte combaciare le circonferenze massime, costituiscono una *superficie sferica* che, per il modo con cui è stata ottenuta, è un CONTINUO bi-dimensionale.

Generalizzando, tutte le superficie posson chiamarsi CONTINUI bi-dimensionali.

Consideriamo, ora, un *cubo*, la cui forma può esserci suggerita da un dado; nulla può impedirci di imaginarlo come generato dalla sovra posizione di un numero grandissimo di *quadrati*.

Poi che il cubo, in certo qual modo, non è se non una porzione limitata di spazio e il quadrato una porzione limitata di una superficie piana, con processo logico, del tutto simile a quello esposto, possiamo giungere a concepire una porzione limitata dello spazio come generata dalla sovra posizione di un numero illimitato di porzioni limitate di una superficie piana, nello stesso modo che consideravamo la superficie di un cilindro come generata da circonferenze ugualmente grandi, e la superficie di una sfera da circonferenze convenientemente degradanti.

In breve: qualsiasi porzione limitata dello spazio può ottenersi da porzioni limitate di superficie. Generalizzando, possiamo, in fine, considerare lo spazio illimitato come generato dalla sovra posizione di un numero infinito di superficie illimitate.

Allo stesso risultato si giunge se, in vece di considerare superficie piane, si considerano superficie curve; allo spazio illimitato si giunge così da un « insieme » continuo di piani illimitatamente grandi come da un « insieme » illimitato di superficie sferiche, sempre crescenti, imaginate come le superficie di tante palle, le une incassate nelle altre, con perfetta reciproca aderenza. Così lo spazio

può considerarsi come un CONTINUO mono-dimensionale di superficie, e siccome ogni superficie è un CONTINUO bi-dimensionale, così lo spazio è un CONTINUO tri-dimensionale.

Se consideriamo l'insieme dei CONTINUI mono-dimensionali, cioè le linee, ci si manifesta fra essi una importante differenza che vogliamo chiarire.

A tale uopo ammettiamo che il Mondo sia un CONTINUO mono-dimensionale. Cioè il Mondo sia costituito da un'unica linea retta; in tal caso, evidentemente, non vi sarebbe possibile l'esistenza della grande famiglia delle linee curve, delle linee, cioè, che sono sì CONTINUI mono-dimensionali, ma si fatte da richiedere, per il loro svolgimento, la seconda e, spesso, anche la terza dimensione. Mentre una circonferenza può considerarsi come giacente in un piano determinato, il filo di una molla a spirale, ad esempio, rappresenta una linea che si svolge nello spazio tri-dimensionale. Sia la circonferenza che il filo della molla, sono CONTINUI mono-dimensionali; ma la loro esistenza è possibile soltanto in un mondo pluri-dimensionale. Se il mondo fosse bi-dimensionale, linee della forma del filo di una molla a spirale non potrebbero esistervi, così come le superficie sferiche e cilindriche e, in generale, tutte le superficie non piane, cioè tutte le superficie curve. I CONTINUI di tale specie hanno possibilità di esistenza in un mondo a tre dimensioni. Il nostro, indubbiamente, è un CONTINUO tri-dimensionale che

abbiamo rappresentato per mezzo di un sistema di coordinate. Con tale sistema è stato possibile individuare la posizione di punti nello spazio. Ogni singolo punto è stato individuato dalle sue tre coordinate, cioè dalle distanze del punto dai tre piani del sistema prescelto.

Un nuovo sistema di coordinate. — Lo stesso scopo può raggiungersi con un metodo alquanto diverso.

Assumiamo come piani del sistema di coordinate tre piani U, V, W. Il punto che essi hanno in comune, cioè quello in cui si incontrano, è un punto dello spazio, ben determinato, e costituisce l'*origine* del sistema.

Ma un punto di incontro di tre coordinate può essere anche qualsiasi altro punto dello spazio, ottenuto, nel modo che vedremo, dall'incontro di altri tre piani.

Tracciamo tre serie di piani, ciascuna illimitatamente numerosa e costituita di piani paralleli tra loro e paralleli ad uno, e soltanto a quello, dei piani considerati U, V, W, tali che la reciproca distanza sia sempre la stessa e sufficientemente piccola: la sua lunghezza sarà per noi la lunghezza unitaria. I piani della serie parallela ad U saranno ancora chiamati piani U; così quelli della serie parallela a V, piani V; quelli della serie parallela a W, piani W. Però, per distinguerli, chiameremo U_0 quello di base che chiamavamo U, piano U_1 il primo della serie, piano U_2 quello che segue immediatamente il primo, e

così via fino ad assegnare ad ogni piano della serie U un numero progressivo. Analogamente chiameremo con Vo, V_1, V_2, V_3, ecc.; Wo, W_1, W_2, W_3 ecc. i piani delle altre due serie V e W.

Evidentemente il complesso dei piani U, V, W suddivide lo spazio illimitato in un numero illimitato di porzioni di spazio, ciascuna della forma di un cubo.

Se fissiamo la distanza tra due piani paralleli consecutivi di ciascuna serie, in modo che sia la più piccola possibile, cioè se fissiamo la più piccola unità di misura possibile, ad ogni punto dello spazio corrisponderà il punto di incontro di tre piani, ciascuno appartenente ad una serie diversa da quella degli altri due. Un punto dello spazio, per ciò, sarà individuato da tre numeri che possiamo definire come tre coordinate, precisamente quelli che contraddistinguono i piani che in esso si incontrano. Ad esempio, un punto P nel quale si incontrino U_2, V_4, W_3 avrà per coordinate i numeri 2, 4, 3.

Geometria euclidea. — Nessun dubbio su la possibilità di ammettere come buono il metodo descritto: anzi, per anco può pensarsi che esso sia l'unico adatto a determinare la posizione dei punti dello spazio.

Ma occorre procedere a passo misurato, se pure lungo.

La possibilità di suddividere lo spazio nel modo indicato presuppone la validità della Geometria euclidea, la sola generalmente conosciuta, basata

su i tre noti assiomi fondamentali (pag. 19), il cui fondatore è il matematico più grande dell'antichità greca: Euclide (330-275 a. C.). Agli esperti negli studi matematici non riesce certo difficile di comprendere la ragione di tale legame; ma, in vero, ciò non è troppo difficile né pure per noi.

Consideriamo a sè una piccola porzione spaziale della forma di un cubo. Affinchè si possa imaginare ciascuna delle sei superficie limitanti detta porzione come una delle superficie di un altro cubo uguale, consecutivo in una qualsiasi delle sei direzioni possibili, è condizione essenziale nel nostro metodo che ciascuna superficie sia un quadrato e ogni angolo di questo un angolo retto. Per ciò la somma degli angoli di ogni singolo quadrato deve essere uguale a quattro angoli retti. Questa proposizione può essere facilmente dimostrata con la Geometria euclidea; cioè la sua giustezza può riferirsi alla giustezza degli assiomi fondamentali della Geometria euclidea. Più precisamente: la somma degli angoli di un quadrato è uguale a quattro angoli retti *soltanto* se le proposizioni euclidee sono giuste, e il nostro metodo ha valore e la sua applicazione è possibile soltanto se la somma degli angoli di un quadrato sia uguale a quattro retti.

Per ciò può dirsi, con parole più proprie, che condizione necessaria affinchè il procedimento suggerito possa seguirsi è che lo spazio possegga una *struttura euclidea*.

Geometria non-euclidea. — La struttura euclidea dello spazio è la sola possibile?

Il matematico francese Enrico Poincaré nella sua opera *La Scienza e l'Ipotesi*, ci risponde che no, ricorrendo ad un esempio molto chiaro e molto significativo, che noi riportiamo nella sua più semplice forma.

Imaginiamo un mondo racchiuso in una grossa sfera nella quale la temperatura sia diversa in tutte le direzioni e in ogni punto di ciascuna di esse: massima nel centro, decrescente a mano a mano che ci si avvicini alla superficie su la quale regni la minima temperatura possibile, cioè la temperatura dello « zero assoluto ».

Si sa che tutti i corpi (1), se riscaldati, si allungano, se raffreddati, si accorciano. Quelli del mondo considerato si comportino ugualmente, rispetto alla temperatura. Supponiamo che una determinata lunghezza, per un aumento di temperatura, si allunghi *sempre di una data quantità* indipendentemente, cioè, dalla natura della materia costitutiva, e che, inoltre, ogni corpo in movimento nel mondo, muti la sua struttura in corrispondenza delle variazioni di temperatura subìte per effetto del moto stesso.

Un abitante di un tale mondo potrà esaurire il suo spazio riempiendolo con piani delle tre serie descritte? No.

Pensiamo, in fatti, al modo di comportarsi dei

(1) Eccettuato, in determinate condizioni, il caucciù.

corpi differentemente riscaldati: se prendiamo un foglio di gelatina per i suoi bordi, il calore che comunica la nostra mano riscalda da prima i bordi stessi e si propaga, poscia, a tutto il foglio, ma raggiungendo temperature diverse, che incurvano il foglio stesso.

Or bene, i piani del MONDO del Poincaré si comportano come tanti fogli di gelatina: si incurvano e si incurvano diversamente, a seconda delle temperature che raggiungono le varie porzioni di spazio, nelle porzioni stesse, si trasformano in altrettante superficie curve; le porzioni spaziali cessano di essere cubiche e tutte uguali, diventano dissimili da quelle primitive e con queste non conservano in comune se non il numero degli angoli: otto. Ogni porzione è diversa dalle altre e limitata da 6 superficie svariatamente curve; gli angoli sono pure diversi e la loro somma non è più uguale ai quattro angoli retti.

In altre parole, un mondo come quello imaginato avrebbe una Geometria diversa da quella a noi consueta, l'euclidea, avrebbe una Geometria così detta *non-euclidea* (2).

---

(2) Una trattazione, semplice, ma interessante, è quella di Tiberio Fenolli: *Geometria non-euclidea*, ed. Sonzogno.

Tra i precursori delle Geometrie non-euclidee merita di essere ricordato un colto gesuita italiano: Padre Girolamo Saccheri (1667-1733); tra i fondatori ciascuno con un proprio sistema geometrico, il russo Lobacewschi (1793-1856) e il tedesco Riemann. Tutte le Geometrie non-euclidee hanno in comune l'abbandono del quinto postulato d'Euclide, il così detto *postulato delle parallele*, che non si è riesciti sinora a dimostrare rigorosamente: « due rette attraversate da una terza si incontrano

Il sistema di coordinate del Gauss. — Ma non per ciò sarebbe impossibile la determinazione di un punto dello spazio per mezzo di un sistema di coordinate. Soltanto che, in vece che piani, gli elementi fondamentali sarebbero superficie curve; potrebbero essere tre serie di superficie curve *U*, *V*, *W*, la cui forma dipenderebbe dalla temperatura regnante nella porzione corrispondente. Ciascuna superficie sarebbe contro segnata da un numero progressivo — come già, prima i piani — ed ogni punto sarebbe contra distinto da tre numeri che ne costituirebbero, con pieno diritto, le *coordinate*.

Un simile sistema di coordinate è stato introdotto nelle scienze dal matematico tedesco Carlo Federico Gauss (1777-1855) e porta il nome di *sistema di coordinate del Gauss*.

---

dalla parte in cui la somma degli angoli interni (due) formati dalle tre rette a due a due, è minore di due angoli retti ». Per dare un'idea molto sommaria delle differenze che passano tra i tre sistemi geometrici euclideo, lobacewschiano, riemanniano, diremo che la somma degli angoli di un triangolo è, rispettivamente, uguale (Euclide), minore (Lobacewschi), maggiore (Riemann) a due retti, e che il numero delle parallele ad una retta che posson farsi passare per un punto dato è uguale ad uno (Euclide), infinito (Lobacewschi), è uguale a zero (Riemann).

Oltre le tre Geometrie citate, potrebbero costruirsene altre ed infinite ne han costrutte il Riemann, il Veronese e l'Hilbert, quelle degli ultimi due chiamate *non-archimedee*, perchè non tengon conto o negano un assioma di Archimede. Ma secondo Sophus Lie il numero di Geometrie tri-dimensionali possibili, compatibilmente al moto delle figure, che non alteri le figure stesse, non solo non è infinito, ma è peranco ristretto.

Il sistema del Gauss, a petto del sistema cartesiano, offre sostanziali vantaggi. In questo ultimo, in fatti, le coordinate di un punto sono le *distanze* di esso dai tre piani coordinati.

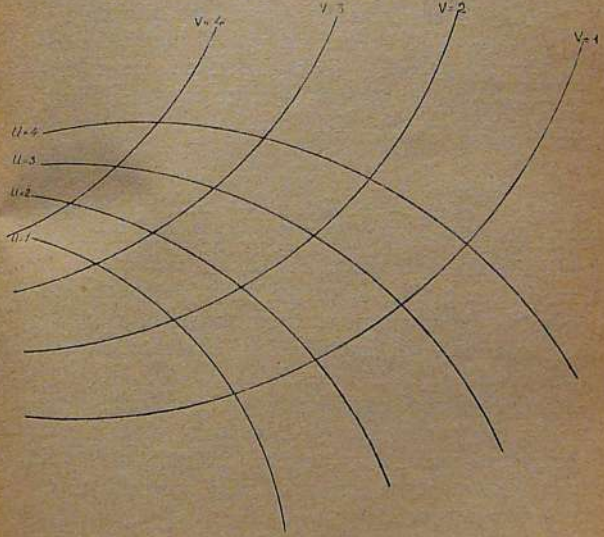

Fig. 12.

Parlare di distanze nel sistema del Gauss sarebbe assurdo: le linee congiungenti un punto con le tre superficie curve sono difformi, contorte e non potremmo seguire alcuna norma per determinarle, per misurarle. Ma non v'è né pure il bisogno di tal misura nel sistema del Gauss.

Per individuare con tal sistema la posizione di un punto dello spazio basta la indicazione dei numeri che contra distinguono le tre superficie curve U, V, W quale che sia la struttura geometrica dello spazio. Se tale struttura è euclidea, il sistema del Gauss si trasforma in un sistema di tre piani; se, in vece, non è euclidea, gli elementi fondamentali del sistema sono superficie curve, talvolta complessissime, ma sempre idonee alla determinazione da noi ricercata.

La concezione di un mondo con una Geometria non-euclidea. — Sinora abbiamo considerato il mondo del Poincaré dal nostro abituale punto di vista, l'abbiamo cioè osservato avendo per guida le nozioni della Geometria euclidea. E siamo giunti a vedere come le proprietà dello spazio di quel mondo siano diverse da quelle dello spazio a struttura euclidea.

Ora vogliamo considerare quel mondo nello spazio che veramente gli è proprio, cioè in uno spazio non-euclideo, e metterci noi stessi in un tale spazio, come se ne fossimo i suoi naturali abitatori. Che avverrà?

Una prima risposta semplice, senz'altro: Non percepiremo alcuna delle incongruenze che di fatto osserveremmo quali abitatori di un mondo euclideo, poi che non potremo scernere alcuna differenza tra le porzioni cubiche e le ottagone, rispettivamente euclidee e non-euclidee.

In fatti, nel trapasso dall'uno all'altro mondo, l'unità di misura, che porteremo con noi, così come

tutti i corpi esistenti nel nuovo mondo, nel passare da punto a punto diversamente influenzato dalla temperatura, si incurverà e non potremo accorgercene poi che noi stessi ci incurveremo sì che verrà a mancarci qualsiasi possibilità di confronto con la forma dei corpi esistenti nel mondo euclideo, confronto che solo ci permetterebbe una distinzione tra la forma euclidea e quella non-euclidea.

E noi, illudendoci di valerci ancòra, dopo il trapasso, della Geometria euclidea ci varremo, in realtà, della Geometria non-euclidea.

Il valore delle Geometrie. — Questa considerazione ne trae seco un'altra. E cioè: poi che riteniamo di valerci nel mondo del Poincaré, realmente della Geometria euclidea, che cosa ci costringe a chiamare la nostra Geometria, Geometria euclidea? Non sarebbe possibile di pensare che il nostro Spazio possegga in realtà una struttura non-euclidea, pur se noi non possiamo accorgercene, pur se basiamo la nostra Geometria su le premesse di una struttura euclidea? Che, in realtà, un cubo non è un cubo nel senso euclideo, ma una porzione di spazio limitata da superficie del tutto curve? Che, in realtà, un cubo, quando lo si sposti nello spazio, non rimane invariato, ma, in vece, ora si allarga ed ora si restringe nel modo più complicato?

In vero tutto ciò sarebbe possibile, senza che alcuno potesse provarci che la nostra attuale Geometria è veramente la giusta. Tutta questa nostra Geometria non sarebbe dunque, se non una

finzione e una *finzione* arbitraria? Una ipotesi? Indubbiamente: sì! Una finzione ed una ipotesi suggerite dall'esperienza.

Nella natura v'è dei corpi che, muovendosi, conservano immutata la loro struttura: sono appunto essi che ci hanno condotti ai concetti della Geometria generale, di corpi, superficie e linee. È indubbio che *le leggi del divenire fisico assumono la forma più semplice, se enunciate secondo la Geometria euclidea.*

Basti pensare all'enunciato delle leggi di inerzia, della propagazione rettilinea della luce, delle leggi del Keplero per potercene convincere. Se volessimo rappresentarci lo stesso divenire, riferendolo ad uno spazio con struttura non-euclidea, non ci troveremmo, certo, di fronte a contraddizioni, ma le leggi sarebbero espresse in forma oltre ogni modo complicata.

Come dal nostro punto di vista euclideo il mondo del Poincaré a incostante temperatura ci appare quale un mondo deformato, così le nostre osservazioni, esiliate dalla struttura non-euclidea, avrebbero un diverso significato. La figura dei corpi dovrebbe dipendere dalla loro posizione e mutare, quindi, per effetto di movimenti, più o meno importanti. La luce correrebbe per vie curve, il moto dovuto all'inerzia avrebbe una trajettoria irregolarmente curva, il moto dei pianeti intorno al Sole sarebbe espresso con leggi così complicate, che quelle semplicissime, espresse dal Keplero, ci apparirebbero financo impossibili.

Per ciò la Geometria euclidea non può essere sostituita da alcun'altra, se non per speciali ragioni, assolutamente imperative.

« Poi che le relazioni su la misura dello spazio non corrispondono alle premesse della nostra Geometria », il che rappresenterebbe una delle ragioni sopra accennate, la sostituzione dovrebbe essere decisa « non appena i fenomeni potessero spiegarsi con maniere più semplici ». Queste parole sono del matematico tedesco Bernardo Riemann (1826-1866), tratte dalla sua prolusione: « Su le ipotesi fondamentali della Geometria », pronunziata d'innanzi alla facoltà di filosofia della Università di Göttingen, il 10 giugno 1854, per la abilitazione all'insegnamento. Dice il Riemann che non si può parlare dello spazio « in sè », che tutte le Geometrie non-euclidee hanno gli stessi diritti di esistenza, che ha la Geometria euclidea, se bene, per motivi di opportunità, di comodità, effettuiamo una determinata scelta allo scopo di ottenere una descrizione semplice del divenire della natura.

Il mondo tetra-dimensionale (3). — In tale

(3) Il fisiologo francese E. de Cyon, morto or non è molto, in Italia, in una tappa del viaggio — troppo lungo per i suoi anni e la sua salute, — che dalla Francia avrebbe dovuto portarlo in un tranquillo *retiro* conventuale, preparatogli da un amorevole discepolo, J. Alvarez de Toledo (vedi *Le problème de l'espace*, Alcan, Paris), nell'opera: *L'oreille — Organe d'Orientation dans le temps et dans l'espace*, Alcan - Paris, e Zanichelli - Bologna, espone una sua teoria circa il compito che avrebbero i *canali semi-circolari* dell'orecchio nell'orientamento. L'uomo ha tre paia di tali canali, i sorci giapponesi ne han

descrizione lo spazio è strettamente legato al tempo, gli oggetti ed i fenomeni sono concepiti come sintesi di luoghi spaziali » e di tempi. Non vi è « luogo » se non in un « tempo » determinato, non vi è « tempo » che non ci porti all'osservazione di un « luogo » determinato. Il Tempo e lo Spazio appaiono indissolubilmente legati.

Da tale considerazione il matematico tedesco Hermann Minkowski (1864-1909) fu indotto a cambiare la consueta concezione del tempo e dello spazio: *D'ora innanzi lo Spazio e il Tempo in sè e per sè devono tramontare e soltanto una specie di intima unione dell'uno e dell'altro può avere una esistenza autonoma.*

Questo il Minkowski annunziò in una prolusione tenuta a Colonia il 21 settembre 1908 per l'ottantesimo congresso dei medici e dei naturalisti tedeschi. Il mondo del divenire naturale

---

due, le lamprede (sorta di pesci) ne hanno uno; or bene, a seconda del numero dei canali, gli esseri viventi credono di vivere in uno spazio a tre, a due, a una dimensione, e regolano i propri movimenti conseguentemente. Perchè l'uomo ha tre paia di canali, noi concepiamo lo spazio a tre dimensioni, e non potremmo concepirlo a più di tre dimensioni.

Se possedessimo più di tre paia di canali? Per rispondere a tal domanda, disse il de C'yon all'Alvarez, il Reimann fu preso da follia.

Il linguaggio matematico permette di rappresentare con simboli uno spazio con un numero qualsiasi di dimensioni.

Quello tetra-dimensionale del Minkowski è però tutt'altra cosa, perchè la quarta dimensione (tempo) è di natura diversa dalle altre tre, spaziali. Così pure dicasi della quarta dimensione del regno medianico, il cui dominio è riservato ad esseri privilegiati, ai *medium*.

deve considerarsi come un CONTINUO tetra-dimensionale.

È facile comprendere la legittimità di questo modo di concepire. Consideriamo il più semplice fenomeno fisico, la posizione allo stato di quiete di un punto materiale nello spazio tri-dimensionale. Questo punto occupa, in ogni momento, una stessa posizione dello spazio, e il divenire, per ciò, non consiste se non nella continua successione dello stesso punto spaziale, nel tempo che passa.

È conforme a ciò la nostra precedente considerazione, per la quale, ad esempio, un cubo è una continuata successione di una stessa superficie quadrata, piana, nella larghezza che diventa sempre più grande, e la sfera può essere concepita come una successione continuata di diverse superficie sferiche, l'una incassata nell'altra consecutiva. Così il divenire di un punto materiale nello spazio tri-dimensionale rappresenta una successione continuata di diverse posizioni nello spazio.

Con altre parole: qualsiasi divenire fisico deve considerarsi come un CONTINUO tetra-dimensionale degli infiniti PUNTI — AVVENIMENTO O PUNTI TEMPO-SPAZIO. Ciascuno di essi è chiamato dal Minkowski con designazione facilmente comprensibile PUNTO DI MONDO; l'insieme di tutti costituisce il MONDO.

Il matematico ha la possibilità di trasportare nel mondo tetra-dimensionale i metodi di indagine geometrica propri dello spazio tri-dimensionale. Nel MONDO la posizione di ogni PUNTO DEL

MONDO è stabilita con la indicazione di quattro coordinate, tre spaziali, per definire il punto nello spazio, ed una di tempo, per definire il tempo dell'avvenimento relativo.

Dalla comune Geometria tri-dimensionale nasce una TEORIA DELL'AVVENIMENTO TETRA-DIMENSIONALE O FISICA.

Per farci un'idea un po' chiara di tale concetto, riportiamo talune frasi della prolusione citata dal Minkowski, modificate per renderle facilmente comprensibili. « Io potrei tracciare su la lavagna i quattro ASSI DI MONDO di un sistema di coordinate del MONDO. Uno di essi si compone di molecole oscillanti e segue la Terra nel suo viaggio e ne è possibile l'astrazione; questa, unita alla maggiore, suggerita dal numero 4, non urta le possibilità concettuali del matematico. Per non lasciare in alcun punto un vuoto non spiegabile, voglio imaginarmi che in tutti i punti vi sia qualcosa di percettibile, che, per non chiamarla materia o elettricità, denominerò SOSTANZA. Io dirigo la mia attenzione ad un determinato PUNTO SOSTANZIALE del mondo ed imagino di trovarmi nella possibilità di riconoscerlo in ogni momento. Ad ogni determinato tempuscolo possono corrispondere determinate variazioni delle coordinate spaziali del punto. Così ottengo come imagine del corso eterno della vita di questo punto una curva, una LINEA DI MONDO, i cui singoli punti si riferiscono a tutte le possibili misure del tempo.

L'intero MONDO appare solcato da queste LINEE

DI MONDO, che lo dividono. Quindi nel MONDO, non più uno spazio, ma un numero illimitato di spazi, così come nello spazio tri-dimensionale vi è un numero illimitato di piani.

La Geometria tri-dimensionale, così, diventa un capitolo della FISICA tetra-dimensionale

Ben si comprende perchè in principio io abbia detto che Spazio e Tempo devono tramontare per cedere il posto ad un mondo in sè».

Ma, ora, ci si può chiedere, quale scopo abbia questa incessante generalizzazione delle nostre rappresentazioni dello spazio. E, peranco, può credersi che essa non sia se non l'espressione del nostro desiderio di sempre più vaste astrazioni delle quali si compiacciono i matematici: il fisico ne ha veramente bisogno?

L'idea del Minkowski di un immenso mondo tetra-dimensionale — è proprio così — è veramente utile al fisico più che a qualsiasi altro scienziato.

Il MONDO semplifica il nostro quadro di rappresentazione in modo tale che niuno avrebbe osato sognare. Il Minkowski, allargando la concezione da lui imaginata, giunse al sorprendente risultato che *la validità del principio di Relatività particolare einsteiniana non dice nè più nè meno che il* MONDO *tetra-dimensionale possiede una struttura euclidea.*

Con altre parole, il metodo con il quale possiamo individuare esattamente la posizione di un punto euclideo tri-dimensionale, può essere esteso, con acconcia generalizzazione, al MONDO.

Per un qualsiasi divenire, ad esempio, il moto di un corpo, nel nostro primitivo di concezione, dovevamo distinguere lo spazio ed il tempo, passare da un dato sistema di coordinate spaziale ad un secondo in moto, rettilineo ed uniforme, rispetto al primo, ricavare le misure di spazio e di tempo secondo le formule dell'Einstein. Ma se consideriamo quel divenire come una LINEA DI MONDO nel mondo tetra-dimensionale, per le ricerche matematiche del Minkowski possiamo giungere alla conclusione che il detto trapasso da un sistema di coordinate all'altro, corrisponde nel sistema del MONDO ad una *rotazione*. Dopo questa rotazione la corrispondente LINEA DI MONDO assume un'altra posizione rispetto al sistema del MONDO. Questa descrizione matematica appare ora ben differente dalla primitiva e, come mostrò il Minkowski, il rapporto tra l'una e l'altra è rappresentato dalle formule dell'Einstein, nelle quali è espresso il principio di Relatività particolare.

Capitolo X

IL PRINCIPIO DI RELATIVITÀ GENERALE DELL'EINSTEIN

Generalizzazione del principio di Relatività particolare. — Ricordiamo brevemente lo sviluppo della esposizione del principio di Relatività particolare.

Con l'esperienza Michelson-Morley si scoprì la equivalenza di due sistemi di coordinate, l'uno rispetto all'altro in moto rettilineo ed uniforme, ai quali era riferito il fenomeno di propagazione della luce. L'equipollenza dei su detti sistemi venne assunta quale proposizione generalmente valida. Come sappiamo, questa proposizione si accordava con il processo di relativizzazione del concetto di tempo.

Il principio di Relatività particolare assegna indubbiamente ai sistemi di coordinate in moto rettilineo ed uniforme un posto di privilegio nella natura. Ci si può chiedere perchè tale classe di sistemi debba godere un sì fatto privilegio rispetto alla classe, ben più numerosa, dei sistemi in moto curvilineo e non uniforme. Questa domanda è naturale: viene alle labbra dell'uomo che pensi ed il cui desiderio di allargare il campo delle sue conoscenze lo faccia tendere ad una generalizza-

zione del principio di Relatività. Non soltanto se riferite a sistemi di coordinate in moto rettilineo ed uniforme, ma anche se riferite a tutti gli altri sistemi, in generale, le leggi della natura dovrebbero trovare adempimento, ed il concetto di moto assoluto dovrebbe divenire un «non-senso». Ma ciò è contraddetto dalla nostra esperienza.

Infatti nell'interno di una vettura tramviaria, che si muova con moto rettilineo ed uniforme, non si può mettere in evidenza con alcun esperimento fisico il movimento stesso, quando si riferiscano le nostre misurazioni ad un sistema in quiete rispetto alla nostra vettura; appena però il conduttore faccia azionare i freni e la corsa rallenti, appaiono ben chiare le discordanze dalle leggi naturali. Il nostro corpo, che riposava, da prima, nella vettura, riceve una spinta in avanti, così che la legge di inerzia, secondo la quale il nostro corpo dovrebbe permanere in quiete rispetto alla vettura, non è più soddisfatta. Inoltre, per quanti esperimenti ottici si facciano, su la Terra, di corta durata, durante i quali il moto della Terra possa essere considerato come rettilineo ed uniforme, non si può constatare la minima influenza di quel moto nel corso dell'esperienza.

Se però eseguiamo le nostre osservazioni in un tempo più lungo, come ad esempio nelle esperienze con il pendolo, tosto si palesa il non adempimento alle leggi naturali, dovuto al moto curvilineo della Terra. Se volessimo renderci ragione della necessità del principio di Relatività generale dovremmo molto probabilmente introdurre profondi muta-

menti nelle nostre concezioni antiquate. Consideriamo però esattamente da prima, se, in realtà, ed in quali circostanze possiamo riconoscere per tale un moto non uniforme nel nostro sistema di riferimento.

La gravitazione. — Riportiamo un esempio dovuto ad Alberto Einstein.

Introduciamoci in una grande cassa dall'aspetto di una stanza, provvisti di tutti gli apparecchi adatti ad eseguire precise misure fisiche. La cassa sia in quiete, rispetto allo spazio dei mondi, e così distante da tutti i corpi che su di essa non si manifesti la più piccola forza di attrazione. Se tale condizione si verifica noi indubbiamente non incontriamo alcuna difficoltà per comprendere che tutti gli oggetti contenuti nella cassa sono completamente senza peso. Infatti si sa che il peso dei corpi non è se non un effetto della forza di attrazione, che certo non può manifestarsi nelle condizioni create per la cassa imaginata.

Nella cassa, ora, possa all'improvviso rendersi osservabile una forte trazione che tenda ad attirarci verso la Terra e per la quale tutti gli oggetti che si trovano con noi nella cassa, concordemente, assumano un moto di caduta con velocità costantemente accelerata. Come spiegheremo questo fatto?

Ci si presentano due possibilità:

1.ª Che la nostra stanza, relativamente allo spazio dei mondi, venga spinta all'ingiù con moto costantemente accelerato, cioè con velocità co-

stante. In vero non si potrebbe così spiegare perchè i nostri corpi e tutti i nostri apparati siano stati attratti verso il pavimento della stanza? Poi che ci trovavamo da prima, con tutta la stanza, in quiete rispetto allo spazio dei mondi, per la legge di inerzia tendevamo a permanervi in tutti i tempi, come di fatto avveniva fin quando la cassa non fu sottoposta ad una trazione, non le si impresse, cioè, una accelerazione. In seguito a ciò la stanza, relativamente allo spazio dei mondi, si era affrettata a correre incontro al suo contenuto. Relativamente alla stanza, però, gli oggetti dovevano muoversi in maniera concorde con velocità crescente dal su al sotto. E siccome venivano ostacolati nella loro caduta da un fondo che si trovava sul pavimento della stanza, esercitavano una certa pressione su tale fondo che, alla sua volta, la comunicava al pavimento della stanza. In tal modo diventano senz'altro comprensibili le nostre osservazioni.

2.ª Potremmo concludere altrettanto bene anche così: La nostra cassa era rimasta allo stato di quiete quando, improvvisamente, si manifestò un corpo del Mondo che con la sua forza d'attrazione agì sul contenuto della nostra stanza, per modo che tutti i nostri istrumenti, insieme con noi, vennero attratti verso il pavimento.

Anche questa spiegazione è ammissibile e non presenta contraddizioni; sì che diventa impossibile decidere a favore della prima o di questa.

Ambedue devono considerarsi equipollenti. Il fatto che le più esatte misurazioni fisiche non pos-

sano alterare alcunchè della equipollenza delle due spiegazioni possibili si allaccia ad un altro della massima importanza; il fatto, cioè, che sotto l'azione della forza d'attrazione della Terra il corpo libero cade con moto accelerato e che la velocità di caduta in tutti i corpi è perfettamente la stessa, senza che intervenga la natura della materia che li compone (1).

L'osservazione giornaliera sembrerebbe dovesse dimostrarci il contrario; infatti se lasciamo cadere contemporaneamente un foglietto di carta ed una palla di piombo, questa cade più rapidamente della carta. Ma ciò dipende dall'intervento dell'aria nel fenomeno. Infatti per il suo maggior peso il piombo supera la resistenza dell'aria più facilmente che non la carta. Ma se ripetiamo l'esperienza in uno spazio privo di aria possiamo constatare che *tutti i corpi di qualsiasi natura, di qualsiasi grandezza cadono a terra con la stessa velocità.*

Ora la caduta di un corpo non è se non l'esempio più noto degli effetti della forza d'attrazione.

Abbiamo già parlato della legge di gravitazione del Newton, per effetto della quale ogni corpo è soggetto alla gravitazione, cioè alla possibilità di esercitare su tutti gli altri corpi una forza di attrazione.

Ci si rappresenta il fenomeno pensando che lo spazio venga posto da ogni corpo in uno stato speciale che determina, come dice il fisico, un *campo*

---

(1) Fu esperimentato da Galileo dall'alto della Torre pendente di Pisa.

di gravitazione. Con l'aumentare della vicinanza di un corpo ad un altro, aumenta sempre più la forza del campo. Questa agisce su tutti i corpi che si trovano nel campo stesso e cerca di attirarli al corpo od ai corpi che hanno eccitato il campo, animandoli di un moto che diventa sempre più veloce a mano a mano che essi si avvicinano ai corpi attraenti.

Poi che è costante la velocità di caduta su la terra, possiamo ancora dire che ogni campo di gravitazione imprime a tutti i corpi una accelerazione di grandezza costante, indipendente dalla sostanza che compone i corpi. Si comprende ora che, solo considerando l'esistenza di un campo di gravitazione, sia possibile ammettere la seconda spiegazione. Infatti se la gravitazione preferisse talune anzi che altre sostanze, non potremmo mai attribuire all'influenza di un campo di gravitazione la contemporanea caduta dei nostri strumenti, manifestatasi all'improvviso.

Principio di equivalenza. — Ci rimarrebbe ora da considerare la ipotesi che la nostra stanza, da prima in quiete, si sia posta in moto per una causa ignorata ed abbia assunta una velocità sempre crescente, mentre i corpi, per la loro inerzia, ci avrebbero erroneamente fatto pensare ad una accelerazione di senso contrario, quindi ad un proprio movimento di caduta. In tal modo ci troviamo nella condizione di ritenere che uno stesso fenomeno sia dovuto tanto all'inerzia quanto ad un campo di gravitazione. In tale condizione è

espresso il *principio di equivalenza* dell'Einstein. Per la verità di questo principio ci è impossibile la esatta interpretazione del moto accelerato della nostra cassa; in pari tempo, però, si allontanano le difficoltà che si frapponevano per una generalizzazione del principio di Relatività particolare.

Nell'esempio addotto noi possiamo, con eguale diritto, riferire le nostre osservazioni sia ad un sistema in quiete, sia ad un sistema in moto accelerato, relativamente allo spazio universo.

Enunciato provvisorio del principio di Relatività generale. — Elevando all'altezza di principio universalmente valido il principio di equivalenza che abbiamo trovato confermato in un sol caso — nell'esempio citato — possiamo dare al principio di Relatività generale la seguente formulazione provvisoria: *Tutti i sistemi di coordinate, quale che sia la specie del reciproco moto del quale sono animati, sono equivalenti per la descrizione dei fenomeni naturali.*

Intanto questo è chiaro: il riconoscimento del principio di Relatività generale richiede una nuova formulazione delle leggi naturali.

Nella loro forma attuale esse trovano adempimento solo per i sistemi di coordinate in moto rettilineo ed uniforme.

Di questo mutamento delle leggi naturali parleremo più tardi.

La Relatività generale dello Spazio e del Tempo. — Da prima vogliamo vedere le

conseguenze che derivano dal principio di Relatività generale per le misure di Spazio e di Tempo.

Anche a tal proposito ci serviremo di un esempio dell'Einstein.

Imaginiamo un disco piatto e circolare che giri uniformemente sur un piano in quiete, come una giostra intorno ad un asse passante per il suo centro, perpendicolarmente al proprio piano. Un fisico che si trovi su questo disco, in tutti i punti, eccetto che nel centro, sentirà una forza che tenderà a lanciarlo fuori del disco, forza che diviene tanto più grande quanto più egli si avvicina al contorno del disco, chiamata *forza centrifuga*, che consideriamo come una conseguenza del moto di rotazione relativo al piano in quiete. Il nostro fisico, tuttavia, non sa alcun che di tale movimento, considera il disco come allo stato di riposo ed attribuisce le azioni di forza che si manifestano all'azione di un campo di gravitazione, la cui intensità e direzione mutino da punto a punto. La sua concezione, secondo il principio di Relatività generale, è precisamente giustificata.

Sarà ora possibile al fisico di disegnare un quadrato, cioè quattro segmenti retti di uguale grandezza incontrantisi a due a due ad angolo retto? Indubbiamente no, perchè già, il concetto di linea retta, nel disco rotante, è privo di senso. Che ciò sia si comprende ripensando ai risultati del principio di Relatività generale. Infatti: tutti i punti del disco, tranne il centro, sono compresi nel movimento, riferito al piano in quiete, la loro

velocità è diversa da punto a punto e precisamente cresce con il crescere della distanza dal centro. Per ciò, secondo i risultati del principio di Relatività particolare, una data lunghezza assume in tutti i punti del disco un diverso accorciamento ben definito per ogni punto.

Pensiamo ora ad un bastone di cera. Riscaldato ad una estremità il calore vi si propaga, ma sì lentamente che ogni sua parte assume una diversa temperatura e, poi che la cera come tutti gli altri corpi, in generale, con un aumento di temperatura si distende e proporzionalmente all'aumento stesso, il bastone si allunga in tutte le sue parti e in grado diverso, in modo che si incurva tutto. Ciò avviene anche per una linea retta posta sul disco in parola; con la sola differenza che su di essa influisce non una diversa temperatura, si bene una diversa velocità di moto rispetto al piano in quiete. A noi non importa che la causa sia diversa: basta considerare gli effetti, per ciò che a noi occorre. E gli effetti sono eguali.

In generale ogni segmento di linea, molto piccolo, ha una curvatura propria diversa da quella degli altri.

Così *il concetto di lunghezza di una linea perde ogni importanza* poi che il suo valore cambia da punto a punto. Altrettanto dicasi per la distanza tra due punti sul disco.

Ed è per ciò che la costruzione di un quadrato diventa impossibile per il fisico. Egli ottiene sempre porzioni di superficie limitate da linee curve e la costruzione di quadrati della stessa grandezza diventa impossibile.

Forse sono ancòra più chiare le conseguenze del principio di Relatività generale riflettenti le misure del tempo.

Supponiamo che il fisico ponga in punti diversi del disco orologi perfettamente *uguali* e con lo stesso ritmo uniforme sul piano in quiete. Tale moto uniforme non potrà essere messo in evidenza sul disco rotante, poi che, in generale, ciascun orologio, rispetto a tutti gli altri, è animato di velocità sempre diversa. Quanto più gli orologi distano dal centro del disco tanto più rapidamente sono ritmati; soltanto quelli ugualmente distanti dal centro hanno la stessa velocità.

Come si sa, da quanto si è detto trattando del principio di Relatività particolare, il ritmo degli orologi diventa tanto più lento quanto più rapidamente si muovono. Per ciò sul disco ruotante tutti gli orologi hanno un diverso ritmo e il concetto di tempo diventa indefinibile. Non possiamo più dire qui, evidentemente, che cosa si intenda per « intervallo nel tempo » tra due avvenimenti, se tale intervallo con diversi orologi su uno stesso disco è valutato diversamente.

Così ci incontriamo di fronte ad una nuova difficoltà che non abbiamo ancòra incontrato nè nella Meccanica classica, nè nel principio di Relatività particolare, perchè ci è stato sempre possibile di attribuire alle nostre misurazioni di spazio e di tempo un valore determinato.

Se, ad esempio, assegnavamo ad un certo tratto la lunghezza di 10 chilometri, con ciò volevamo dire

che, scelta l'unità di un chilometro avevamo dovuto riportarla nel tratto stesso 10 volte per giungere ad un estremo partendo dall'altro. La teoria della Relatività particolare ci aveva mostrato — fatto ignoto alla Meccanica classica — che ogni misurazione eseguita in tal modo doveva valere soltanto se riferita ad un determinato sistema di coordinate, e che il risultato doveva essere lo stesso ovunque si trovasse il tratto da misurare, s'intende se allo stato di quiete.

Altrettanto per il tempo. Il dire che la durata di un avvenimento era di dieci secondi voleva dire che un orologio « a secondi », tra il principio e la fine dell'avvenimento doveva far 10 giri. Anche al riguardo la teoria della Relatività particolare affermava che in rapporto ad un sistema di coordinate i risultati dovevano permanere identici quale che fosse il luogo dove l'avvenimento si verificava.

Forma definitiva del principio di Relatività generale. — Or bene, nel disco isolato tutto avviene in modo diverso. I concetti di *distanza tra due punti* e di *durata di un avvenimento* non possono sur esso applicarsi in modo soddisfacente.

Tempo e Spazio perdono, anzi, il loro « ultimo resto di obbiettività fisica » come si è espresso una volta l'Einstein.

Ora in armonia al *principio di equivalenza* dobbiamo pensare sostituito il disco rotante con un altro in quiete sul quale, però, si manifesti un

campo di gravitazione di forza ovunque diversa. Possiamo generalizzare senz'altro l'importante risultato così che in campi di gravitazione le consuete coordinate spaziali e temporali diventano inammissibili. Il che non ci dice se non che il mondo del divenire fisico, che con il Minkowski concepiamo come un CONTINUO tetra-dimensionale, possiede, quando si manifestino campi di gravitazione, una struttura non-euclidea e richiede, quindi, l'uso delle coordinate del Gauss. Possiamo ora dare una formulazione definitiva al principio di Relatività generale dell'Einstein. *Per la espressione delle leggi naturali tutti i sistemi di coordinate tetra-dimensionali del Gauss sono equivalenti* (2).

La struttura spaziale-temporale del mondo è determinata da campi di gravitazione la cui esistenza, come sappiamo, è dovuta alla presenza di masse pesanti. È logico quindi il pensare che tale struttura dipenda dalla legge di distribuzione delle masse esistenti nel mondo e la dipendenza appare chiara dalle nostre precedenti considerazioni.

A seconda della distribuzione delle masse, la scelta di determinati rapporti di misura, nel CONTINUO SPAZIO-TEMPO, ci offre la possibilità di una più semplice spiegazione dei fenomeni naturali.

Quindi non solo Spazio e Tempo, ma Spazio, Tempo e Materia sono indissolubilmente legati e le

(2) La prima memoria dell'Einstein su la Relatività generale è del 1914.

parole già citate della prolusione del Minkowski possono, per ciò, così suonare: « *D'ora innanzi lo Spazio per sè, il Tempo per sè, la Materia per sè debbono tramontare e solo una specie di intima unione Spazio-Tempo-Materia può avere una esistenza autonoma* ».

Confronto tra i due principii di Relatività. — Consideriamo ora la relazione che passa tra il principio di Relatività generale e il principio di Relatività particolare. Quest'ultimo affermava che per descrivere tutti i fenomeni naturali possiamo valerci indifferentemente di ciascuno tra due sistemi di coordinate l'uno in moto rettilineo ed uniforme rispetto all'altro, alla condizione, però, che nel passare da un sistema all'altro, si ricalcolassero le misure di tempo e di spazio con le formule dell'Einstein. Il che equivale al dire che: il CONTINUO tetra-dimensionale SPAZIO-TEMPO possiede struttura euclidea e la espressione delle leggi naturali non varia se si imprime ad un dato SISTEMA del mondo una *rotazione*.

All'incontro, secondo il principio di Relatività generale per descrivere tutti i fenomeni naturali, possiamo adoperare a piacimento un qualsiasi sistema di coordinate del Gauss, purchè nel passare dall'uno all'altro sistema, si attribuisca al CONTINUO-SPAZIO-TEMPO una struttura ben definita.

Siccome la struttura euclidea può considerarsi come un caso particolare di struttura non-euclidea, il principio di Relatività generale è ricondotto al principio di relatività particolare *fuori dell'esi-*

sistenza di un campo di gravitazione, il quale appunto determina la struttura non-euclidea.

L'assenza dei campi di gravitazione non è mai possibile, poi che l'Universo è riempito di corpi celesti, i cui campi di gravitazione si estendono sino alle più estreme lontananze e su la Terra, è indubbio, ci troviamo in un campo di gravitazione. Per ciò, per noi, il principio di Relatività particolare non può essere rigorosamente valido. È un principio di valore approssimato ma si può adoperare da noi con utilità perchè ci troviamo in un campo di gravitazione estremamente debole. Per tal ragione, il principio di Relatività particolare conserva la sua importanza ed ha valore, anche a prescindere dal fatto che dobbiamo ad esso se siamo riusciti a formulare il principio di Relatività generale la cui validità è rigorosa.

Formulazione delle leggi naturali secondo il principio di Relatività generale. — Come si è già accennato la formulazione delle leggi naturali deve essere mutata per armonizzarla con il principio di Relatività generale riferita a tutti i sistemi di coordinate del Gauss.

Prendiamo, ad esempio, la *legge di inerzia* della Meccanica classica, per la quale un punto materiale non influenzato da forze si muove sempre con moto rettilineo ed uniforme. In questa forma la sua validità è condizionata all'assenza di campi di gravitazione e, quindi, all'uso di un consueto

sistema di coordinate: dovremo quindi modificarla, tenendo conto dei campi di gravitazione, in modo però che la nuova forma, nei casi speciali ai quali si è accennato, possa ricondursi a quella classica.

Per la bisogna ci viene in aiuto l'aver definito la linea retta, in un CONTINUO euclideo tri-dimensionale, come la più breve distanza tra due punti dati e l'avere estesa tale definizione ai CONTINUI tetra-dimensionali non-euclidei.

Una tale linea più corta, in un CONTINUO non-euclideo, si chiama linea *geodetica*. La legge fondamentale dell'Einstein suona così: la LINEA DEL MONDO di un punto materiale è una linea geodetica nel continuo Spazio-Tempo tetra-dimensionale. — Questa legge, poi che risponde a tutti i postulati esposti innanzi, può essere ritenuta come una legge fondamentale. Appena, cioè, manchino campi di gravitazione il CONTINUO Spazio-Tempo diventa euclideo e la linea *geodetica* diventa una linea retta. Così la nuova legge fondamentale diventa in questo caso speciale la legge di inerzia della Meccanica classica.

La teoria di gravitazione dell'Einstein. Esperimenti cruciali. — Il più brillante trionfo del principio di Relatività generale ci è dato dal fatto che essa ci conduce a formulare una *teoria della gravitazione*. Se passiamo, cioè, da un determinato sistema del Gauss ad un altro, la espressione matematica della linea geodetica si trasforma in modo del tutto determinato. Poi che ora ad un tale passaggio corrisponde il preciso cambiamento

di un campo di gravitazione, si comprende come, a mezzo di ricerche matematiche, possano ricavarsi delle relazioni tra i due cambiamenti che permettano di stabilire le leggi che regolano il campo di gravitazione. E a tale risultato giunse l'Einstein con la sua teoria di gravitazione, la cui austera bellezza può essere sentita soltanto dal matematico. A noi, purtroppo, deve bastare la conoscenza di alcuni suoi risultati.

La legge di gravitazione del Newton, che noi abbiamo considerata come legge universale, perde la sua generale validità; vale soltanto se circoscritta a campi di gravitazione *a bastanza* deboli. Come sappiamo le leggi del Keplero sul moto dei pianeti, sono conseguenze matematiche della legge del Newton. È naturale, quindi, sorga il dubbio che in campi di gravitazione *abbastanza* forti dette leggi non siano seguite rigorosamente. Gli scarti da dette leggi possono essere calcolati con la teoria di gravitazione dell'Einstein; purtroppo però essi sono così deboli che non potrebbe pensarsi ad una conferma della teoria con osservazioni astronomiche eseguite servendoci dei mezzi oggi disponibili. Ma vi è una eccezione circa la intensità dei campi di gravitazione. «Mercurio», il pianeta più vicino al Sole, si muove in un campo di gravitazione relativamente molto forte: lo scarto deve raggiungere una sensibile grandezza, secondo l'Einstein. La esperienza conferma questa conclusione nel modo più brillante.

Come è noto da lungo tempo (3) la trajettoria di

(3) Per opera di Urbano Luigi Leverrier (1811-1877), lo scopritore di «Nettuno».

Mercurio, rispetto alle stelle fisse, non è in quiete nello spazio, ma si muove con moto straordinariamente lento nella direzione del moto traslatorio dei pianeti. Più chiaramente: quel punto di trajettoria, che è più vicino al Sole, il così detto *perielio*, nel corso del tempo, si sposta rispetto allo spazio del Mondo. Tale spostamento contraddice apertamente l'antica teoria. La teoria dell'Einstein non solo prevede la esistenza di essa, ma ne dà il valore che differisce pochissimo da quello che hanno dato le osservazioni dirette (4).

Ma quella di «Mercurio» non è la sola prova che deponga favorevolmente per l'ammissione della validità della teoria dell'Einstein. La si è saggiata in rapporto alle influenze che campi di gravitazione esercitano sulla propagazione della luce. La teoria, con considerazioni che qui necessariamente dobbiamo omettere, perviene al risultato che le linee spettrali della luce solare (5) rispetto alle corrispondenti linee spettrali di sorgenti di luce poste su la Terra devono essere alquanto spostate. Le esperienze istituite a tal riguardo confermano i risultati teorici.

Un'altra conseguenza è quella che in campi di gravitazione la luce, in generale, deve propagarsi con trajettorie curve. Il grado di curvatura, natu-

(4) Le esperienze condussero a constatare uno spostamento secolare di 42″,9. L'Einstein lo calcolò in 43″ nel 1915.

(5) Le esperienze furono fatte dal Fabry e dal Buisson.

ralmente, dipende dalla forza del relativo campo di gravitazione e, nelle circostanze ordinarie, la divergenza delle trajettorie curve da quelle rettilinee, volute dalla Meccanica classica, sono straordinariamente piccole, di modo che una prova sperimentale, a causa della imperfezione dei nostri strumenti fisici, deve fallire. Ma una eccezione del tipo di quella cui abbiamo accennato parlando di « Mercurio » ci viene in aiuto.

Come è noto gli astronomi possono fissare con la massima precisione la posizione delle stelle fisse, perdute nel cielo. Mentre di solito esse sono invisibili durante il giorno perchè la loro debole luce è vinta da quella del Sole, in un eclissi totale solare emergono chiaramente, in vicinanza del disco solare coperto.

Se noi consideriamo soltanto quelle che appariscono immediatamente accanto al disco solare, i raggi di luce che da esse emergono, su la via verso la Terra, devono precedere il Sole. Questi passano adunque a traverso un campo di gravitazione nel quale sono soggette ad una curvatura che può calcolarsi esattamente secondo le formule dell'Einstein. La conseguenza di tale curvatura dovrebbe essere lo spostamento del punto apparente della stella nel cielo rispetto alla posizione che la stella osservata dovrebbe avere in condizioni normali.

Per queste considerazioni già nel 1914 scienziati tedeschi si recarono al Caucaso con l'intenzione di fare rilievi fotografici durante l'eclissi totale del 24 agosto.

Purtroppo le loro fatiche furono deluse dall'im-

provviso scoppio della guerra, e soltanto il 29 maggio 1919 si offerse ad una spedizione inglese, capitanata da A. C. D. Crommelin, in Sobral nel Brasile, l'occasione di raggiungere la meta desiderata. Nei risultati dell'osservazione di più stelle fisse si ebbe una così bella concordanza con le previsioni dell'Einstein (6) che non può dubitarsi in vero della sua conferma.

La straordinaria importanza di questa conferma, come ha scritto il fisico tedesco M. Laue, «è tanto maggiore in quanto nessuna delle molte teorie della gravitazione, sviluppate come deduzioni della teoria di Relatività particolare e delle quali una intera serie riesce a spiegare fatti della comune esperienza, ed altre danno persino giustamente lo spostamento del rosso delle linee spettrali del Sole, può spiegare questo fenomeno di diffrazione della luce. La sua giusta conferma numerica data dalla teoria di Relatività generale, la quale nasce da così diversi campi dell'esperienza e muta arditamente il nostro quadro del mondo, può considerarsi indubbiamente come uno dei più grandi trionfi dello spirito umano».

Contrasti alla teoria. — Allorchè Alberto Einstein, nel 1916, pubblicò «in riassunto» la sua teoria di Relatività generale, l'arditezza delle sue idee sollevò alto clamore, tanto più che allora mancavano le più importanti conferme sperimentali. Si comprende come anche fisici di grido siano stati av-

(6) In una memoria pubblicata nel 1911.

versi al principio di Relatività generale, ed alla teoria di gravitazione da esso derivata. L'Einstein potè ribadire tutte le obbiezioni degli avversari.

Con speciale acutezza si è volto contro le teorie einsteiniane, nel 1908, il noto fisico di Heidelberg, Filippo Lenard, conosciuto per le sue meravigliose ricerche sui raggi catodici. Secondo il suo modo di vedere il principio di Relatività generale trova buona conferma nell'esperienza. Fin tanto che, per esempio, un treno è in moto rettilineo ed uniforme, non vi sarebbe di fatto alcun mezzo per decidere se il treno stesso e non invece il suo intorno effettui un movimento. Il Lenard così continua: «Si imprima ora al treno considerato un movimento definito non uniforme. Se in conseguenza della legge di inerzia tutto ciò che si trova nel treno va in frantumi, mentre tutto ciò che è fuori del treno resta intatto, allora, secondo il mio avviso, nessun sano intelletto potrà dire che non sia stato il treno a mutare ad un tratto il suo movimento, sì bene il suo intorno. Il principio di Relatività generale, secondo il suo semplice significato, vuole che anche in questo caso si ammetta che chi abbia cambiato di velocità sia l'intorno e che il frantumarsi degli oggetti del treno sia conseguente alla scossa del mondo esterno, impressa da una azione di gravitazione dello stesso mondo esterno su l'interno del treno. Il principio non dà alcuna risposta che menomamente soddisfi l'intelletto, quando si chieda perchè non sia caduto il campanile insieme con il treno quando il mondo esterno al treno ha dato la scossa».

L'Einstein rispose daprima che il Lenard non

tiene conto del senso del principio di Relatività generale, poi che questo principio non afferma in alcun modo che per spiegare uno stesso avvenimento vi siano due casi essenzialmente diversi, ma esso afferma la equivalenza di due modi di concepire. « Quale rappresentazione debba scegliersi? Soltanto motivi di opportunità possono decidere. Il fatto che il campanile non cade avviene per la seconda maniera di rappresentazione del fenomeno, perchè il campanile stesso, insieme con il terreno e tutta la Terra trovasi liberamente in un campo di gravitazione durante la scossa, mentre il treno per l'influenza di altre forze (freno) non può cadere. Un corpo che cade liberamente si comporta rispetto ai fenomeni interni come un corpo che si libri liberamente sottratto a tutte le forze esterne ».

Quindi l'Einstein con un esempio acconcio dimostra « quanto poco appropriato sia chiamare arbitro, in tali fenomeni, il sano intelletto umano ».

Il Lenard stesso dice che non si potrebbero sollevare finora rilevanti obbiezioni contro il principio di Relatività particolare. Che il treno — il quale corre uniformemente — potrebbe essere considerato in quiete; e che le rotaje, insieme con la regione circostante, potrebbero considerarsi in modo rettilineo ed uniforme. Ammetterà questo il sano criterio del macchinista? Questi opporrà che nè riscalda nè unge la regione circostante sì bene la locomotiva, e che, di conseguenza, è nel movimento della locomotiva che si esprime l'armonia del suo lavoro.

Capitolo XI

IL MONDO DELLA TEORIA DI RELATIVITÀ

Il quadro del mondo della Fisica che abbiamo descritto, iniziando il nostro cammino, che ora volge al termine, tendeva a ritrarre l'intera natura come una variopinta vicenda di avvenimenti meccanici.

Stelle ed atomi vertiginosamente corrono nell'immenso spazio senza confini; il Tempo, eterno e senza ritorni, misura la vicenda dei loro moti.

Che cosa sopravvive di tutto ciò, da che la Teoria di Relatività lo ha investito con mitica forza di giganti?

Lo Spazio ed il Tempo: ombre. Il movimento assoluto: concetto privo di senso. La figura dei corpi: diversa da osservatore ad osservatore, imagine soggettiva, non realtà universale. L'etere: bandito per sempre dal regno della Scienza.

Immè, immè,
Tu l'hai distrutto,
Il bel mondo,
Con pugno possente.
Or esso precipita e si frantuma:
Un semidio lo ha abbattuto.
E noi portiamo i rottami nel Nulla.
E noi piangiamo la Bellezza perduta.

Il canto del Poeta può forse trovare una eco nel nostro spirito ignaro. Ma eco che si perde, poi che la teoria di Relatività ci rappresenta un mondo di più chiara bellezza rispetto a quello frantumato e perduto negli abissi del Nulla.

La nuova teoria trasse le sue origini, oramai lontane, dalla spiegazione inattesa dell'esperienza Michelson-Morley, nella quale Alberto Einstein trovò il principio che pose a base della sua teoria. I cui primi risultati condussero alle formule che permettono di calcolare le misure di lunghezza e di tempo, quando si mutino i sistemi di coordinate, scegliendoli fra quelli animati reciprocamente di moto relativo.

Le misure di lunghezza e di tempo hanno la massima importanza nello studio dei fenomeni di moto, poi che il moto di un corpo qualsiasi altro non è, per noi, se non il mutamento della sua posizione nel corso del tempo: è chiaro come, in seguito alle formule dell'Einstein, il moto dovesse assumere una forma completamente nuova.

Composizione dei movimenti. — I fisici anteriori all'Einstein avevano tacitamente ammesso che le misure delle grandezze dello spazio e del tempo fossero del tutto *indipendenti* dallo stato di moto del sistema di coordinate adoperato.

Per calcolare il moto di un sasso cadente sur un carro ferroviario, in corsa uniforme e rettilinea, presso a poco operavano così: fissavano da

prima le leggi del moto di caduta rispetto al carro, cioè stabilivano, con l'ausilio di orologi e di misure di lunghezza, a quale distanza dal carro il sasso veniva a trovarsi nei diversi tempi; misuravano, inoltre, il movimento proprio del carro, rispetto alla massicciata della ferrovia, fissando anche su questa, con l'ausilio di orologi e di misure di lunghezza, il cambiamento della posizione del carro nei diversi tempi successivi.

Poi che secondo la legge di inerzia il sasso doveva partecipare al moto rettilineo ed uniforme del treno, ritenevano di poter determinare il vero moto del sasso sommando con procedimento geometrico il moto di caduta rispetto al carro, con il moto del treno rispetto alla massicciata. Le teorie dell'Einstein ci dicono ora che tale procedimento non è ammissibile perchè non tien conto della circostanza che le due singole misurazioni di lunghezza e di tempo — quella cioè sul carro e quella su la massicciata — non possono sommarsi senz'altro, come se fossero della stessa specie. Il carro e la massicciata si devono in vece considerare come due distinti sistemi di coordinate, l'uno rispetto all'altro in moto rettilineo ed uniforme, e le misurazioni, nello spazio e nel tempo, calcolate in uno dei due sistemi, devono essere ricalcolate, per mezzo delle formule dell'Einstein, prima che le si possa mettere in relazione con quelle ottenute nel secondo sistema.

Le leggi della Meccanica sono soltanto approssimate. — In questo modo la teoria

della Relatività toglie il carattere di assoluta giustezza agli enunciati di tutte le leggi della Meccanica.

Queste conservano solo un valore approssimativo e possono applicarsi con vantaggio, soltanto a moti aventi velocità relativamente basse rispetto a quelle della luce, poi che, come risulta dalle formule dell'Einstein, le differenze delle misure di lunghezza e di tempo sono percettibili solo quando si tratti di velocità di centomila e più chilometri al minuto secondo. Tale condizione non si verifica per la maggior parte di tutti i fenomeni meccanici: gli stessi movimenti dei corpi celesti conosciuti avvengono con velocità di gran lunga minore e la teoria di Relatività particolare applicata ad essi non conduce a essenziali divarî.

La sua applicazione, però, si rende necessaria, nello svolgimento dei fenomeni meccanici, per il suo valore di principio. A mo' di esempio: un orologio che si trovi all'Equatore deve avere un ritmo più lento, se bene di poco, di quello che esso avrebbe se si trovasse in uno dei Poli.

Anche per altri motivi le leggi fondamentali della Meccaniea classica sono leggi approssimate, cioè non esatte, ma presso a poco esatte. Esse, in fatti, non tengono conto della circostanza che l'Universo, a causa della presenza dei corpi celesti, è un unico campo di gravitazione, di forza variabile diversamente da luogo a luogo. La esistenza del campo di gravitazione condiziona la struttura spaziale-temporale del Mondo e al posto delle note

leggi della Meccanica devono subentrare altre più generali che tengano conto del campo stesso.

Il moto dei pianeti e degli elettroni. — Ricordiamo a quali conclusioni noi siamo stati indotti circa il moto dei pianeti: conclusioni che sono state confermate per «Mercurio» in modo brillante. Ma se risulta mutata la rappresentazione del corso dei corpi celesti non v'è ragione perchè non lo siano, e in maggior misura, i movimenti degli elettroni nel minuscolo atomo dei chimici. La loro turbinosa velocità intorno al *nocciolo* carico di elettroni positivi esige imperativamente l'applicazione della Teoria di Relatività.

Al fisico di Monaco, Arnold Sommerfeld, spetta il merito di aver sviluppate le ricerche teoriche relative all'argomento. Egli riepiloga i risultati ai quali è giunto, dicendo che la nuova concezione circa la costituzione degli atomi fa naufragare la vecchia teoria dell'assoluto che deve cedere il campo alla teoria di Relatività.

La velocità della luce. — La derivazione delle formule einsteiniane della Teoria di Relatività particolare fu occasionata dal bisogno di fissare giustamente il fenomeno della propagazione della luce sulla Terra e si comprende facilmente come in tali formule il valore della velocità della luce assume un'importanza del tutto caratteristica.

L'unità della natura. — Le formule einsteiniane servono di norma nel seguire il decorso

di tutti i fenomeni meccanici. Ma vi è di più. Con esse nella Meccanica generale si introduce una grandezza che assume una grande importanza nel campo non meccanico, in quello, cioè, a cui si applicava nella Fisica classica la Meccanica dell'etere.

Da tale considerazione sorge l'idea che fra quei due grandi campi della Fisica debbano intercedere importanti relazioni che abbian la loro origine nella unità del divenire naturale, che costituiva un pensiero dominante della Fisica classica, invocata dal desiderio di intravvedere l'essenza di tutti i fenomeni fisici in taluni movimenti.

E, di fatto, nel corso dei secoli, si era riesciti a formulare come fenomeni meccanici quelli termici ed acustici. Il calore di un corpo venne considerato come la manifestazione del moto impetuoso e disordinato delle sue molecole; tutte le leggi della teoria del calore vennero derivate quali semplici conseguenze di natura meccanica dei moti molecolari. Il suono, a sua volta, venne considerato come dovuto ad una serie di condensazioni e rarefazioni, a mo' di onde, dell'aria, provocate dai corpi vibranti.

La ricerche intorno alla natura della luce dell'elettricità, del magnetismo e dell'irraggiamento del calore presentarono serie difficoltà. Si giunse, tuttavia, ad ammettere tutte quelle forme di energia come manifestazioni diverse di una stessa causa, propria della meccanica dell'etere.

Ad onta di ciò le difficoltà rimasero insuperate ed anzi raggiunsero il loro « maximum » quando

l'esperimento Michelson-Morley diede il colpo di grazia all'ipotesi dell'etere.

Si dubitò, peranco, se veramente non fosse vana cosa affannarsi a spiegare tutti i fenomeni fisici, ma alla fine del secolo XIX si manifestò l'opinione che, per giungere alla meta desiderata, cioè alla unità delle forze naturali si dovesse ammettere che nei fenomeni elettrici fosse l'imagine essenziale di tutto il divenire del mondo. E tale opinione ha avuta la più brillante conferma nella Teoria di Relatività. Ma, purtroppo, la comprensione completa di questo fatto molto importante può raggiungersi solo a traverso dimostrazioni matematiche molto complicate, poi che il problema dell'unità desiderata si risolve in un problema matematico e noi dobbiam accontentarci della conoscenza della sola soluzione in forma comprensibile ed esatta al tempo istesso, per quanto ce lo permette il linguaggio comune.

Il risultato essenziale dell'applicazione della Teoria di Relatività è che i *fenomeni meccanici possono considerarsi come fenomeni di natura elettro-magnetica.* E, non le leggi fondamentali della Meccanica del Newton, si bene quelle fondamentali dell'elettro-magnetismo moderno sono la base della Fisica. Così si è giunti nel modo più meraviglioso ad ammettere la unità cercata.

La conservazione della materia. — Ma trattiamo, ora, di un argomento che è pianamente accessibile anche ai profani delle matematiche.

Dalla Chimica ci è nota la *legge della conserva-*

zione della materia, per la quale né pure la più piccola quantità di materia può perdersi, o prodursi dal nulla (1). In altre parole: il contenuto sostanziale dell'Universo è una grandezza eternamente immutabile. Prima del Lavoisier il contrario era impensabile, per gli scienziati. Anche a tal riguardo la teoria di Relatività penetra con le sue mani robuste nel tessuto del nostro pensiero e la legge del Lavoisier ne è sconvolta, frantumata: essa può valere soltanto come legge approssimata.

L'Einstein ce ne convince. Se si aumenta in qualche modo il contenuto di energia di un corpo, secondo l'Einstein, deve aumentare contemporaneamente la sua massa. Consideriamo, ad esempio, una palla di biliardo: se si trova allo stato di quiete, per metterla in movimento dobbiamo impiegare una forza di un determinato valore. Misuriamo sperimentalmente il valore di questa forza. Possiamo constatare che con essa si può ricondurre la palla allo stato di quiete.

Ma illuminiamo, ora, la palla con una lampada ad arco; l'avorio assorbirà una grande quantità di luce ed il suo contenuto d'energia sarà aumentato. Or

(1) La formulazione della *legge di conservazione della materia* è dovuta al Lavoisier che si può dire l'abbia trovata per mezzo della bilancia. Così scrive presso a poco nel suo *Trattato di Chimica*: « Nulla si crea, nè per opera dell'uomo, nè per opera della natura e può ritenersi per principio che in ogni fenomeno chimico, compiuto dalla natura con le sue forze o dall'uomo con la sua arte, sia prima che dopo il fenomeno, la quantità di materia è sempre la stessa, che la quantità delle sostanze sia la stessa e che queste soltanto si modificano, si trasformano ».

bene, se vogliamo, dopo ciò, rimettere in movimento la palla, dobbiamo impiegare una forza maggiore di quella che, imprimendole una stessa velocità, era sufficiente per la palla non illuminata. E questo perchè con un aumento di energia deve aversi anche un aumento di massa, per modo che la palla illuminata oppone una maggiore resistenza all'azione della forza, cioè una maggiore inerzia che non la palla oscura, la quale è più povera di energia.

Ma gli aumenti che si verificano sono così piccoli che sfuggono alle misurazioni sperimentali che noi possiamo eseguire. Però la esattezza dell'asserto può essere confermata con indagini teoriche. Il risultato reciproco e, cioè, che alla diminuzione dell'energia di un corpo corrisponde una diminuzione della sua massa è pur esso suffragato dalle indagini sopra dette.

La conservazione dell'energia. — Così — è evidente — anche il valore rigoroso della *legge della conservazione della energia* è infirmato, ed è evidente anche che la quantità di materia e la quantità di energia dell'Universo debbano subire costanti variazioni.

Da quanto si è detto può giungersi anche alla conclusione che la materia non è e non può essere se non una forma di manifestazione della energia. Infatti sarebbe strano ma sopra tutto incomprensibile se, potendosi ricondurre i *cambiamenti della massa a cambiamenti dello stato di energia*, non si potesse ricondurre *tutta* la massa ad energia.

Materia ed *energia* sono così ridotte ad *un tutto inseparabile* e la legge della conservazione dell'energia enunciata da Robert Mayer (1814-1878) e da Hermann von Helmholtz (1821-1894) assurge oggi a legge universale della Fisica comprendente la legge della conservazione della materia.

Nella sua forma primitiva questa legge si presentava al nostro pensiero come veramente difficile: quanto è vario il numero delle forme di energia che si manifestano ai nostri sensi e quanto è vario il gioco dei loro mutamenti incessanti! Tornano alla memoria le parole di Eraclito di Efeso (500-440 a. C.) sul fluire eterno del divenire e pare inconcepibile come ad onta di questo « essere » e « sparire » possa parlarsi di conservazione dell'energia.

La soluzione dell'enigma ci è offerta dalla teoria di Relatività, Per il fatto che conduce ad ammettere che tutto il divenire, nella sua più profonda essenza, sia di natura elettromagnetica, essa, per usare le parole del fisico di Lipsia, Arturo Haas, ci presenta sotto un diverso aspetto il principio della conservazione dell'energia. « Secondo la concezione moderna non v'è trasformazione di energia, poi che vi è una sola specie di energia e precisamente quella del campo elettro-magnetico. Se qualcosa muta non è certo l'energia, sì bene il punto di vista dell'uomo che osserva i fenomeni fisici con i suoi sensi ».

Il mondo è illimitato ma non infinito. — (2) Abbiamo visto mutare a mano a mano la figurazione del mondo, come enunciavamo nuovi

(2) *Illimitato* ed *infinito* si presentano nel linguaggio comune come sinonimi adoperati per esprimere uno stesso concetto, per rappresentarci qualcosa che si allarghi oltre ogni limite che noi possiamo segnare con la nostra mente alla sua grandezza. Se ci troviamo in alto mare, lontani quindi da ogni lembo di terra ed osserviamo la linea nella quale si fondono in uno stesso campo d'azzurro e il mare e il cielo, vediamo questa linea allontanarsi sempre più, a mano a mano che noi vi ci avviciniamo e, fino a che la Terra non ci appaia, può sembrarci che ciò debba avvenire indefinitamente.

Così nasce in noi il concetto di *illimitato*, in tal caso, veramente identico a quello di *infinito*.

Ma non sempre è così: le due parole possono esprimere due concetti affatto indipendenti l'uno dall'altro. L'Einstein ci dice che lo *spazio è illimitato*, ma che la quantità di materia in esso contenuta è *finita*, cioè, non è infinita, contrariamente alla concezione comune (vedi *Scienza per tutti*, 1921, 1 ottobre — Eisenhart-Contu).

Per mostrare come i due concetti di *infinito* e di *illimitato* possano scindersi, anche nel linguaggio comune, cito un esempio un po' simile a quello del Fabre (*Les théories d'Einstein*, Payot, Paris).

Consideriamo sur un mappamondo un parallelo effettivamente tracciato. Esso sia la traiettoria di un minuscolo animale cieco: l'animale non si accorgerà mai — per quanto in realtà ciò avvenga — di passare almeno due volte per uno stesso punto e gli mancherà per ciò un punto di riferimento che possa servirgli ad indicargli il principio ed il termine della trajettoria. Riterrà esso che la trajettoria sia *illimitata* ed *infinita*. Di fatto è *illimitata*, ma *non è infinita*, poi che — ammesso il mappamondo sferico — la lunghezza di essa *è ben definita*, precisamente eguale al prodotto del diametro, *finito*, per il noto numero fisso π. L'esempio è certamente grossolano ma può stabilire una certa diversità dei due concetti di *illimitato* e di *infinito*, il che può bastare.

fatti suggeriti dalla teoria di Relatività. Ma detta teoria ci riserva ancora sorprendenti novità.

La nostra primitiva figurazione rappresentava lo spazio illimitato, infinito. Federico Schiller così esaltò la immensità del Mondo:

Il Mondo, che lo Spirito creatore trasse dal Caos e che fluttua nell'Immenso, io lo percorsi con la furia del vento, fino alli estremi confini delle sue onde.

Giunsi, e gittai l'àncora dove non più spira alcun soffio, dove s'innalza la pietra miliare della creazione.

E vidi le stelle, nascere giovini, correre il firmamento su le vie dei millenni. Le vidi, scherzando, tendere alle mete dilettose; il mio sguardo cercava, errando intorno, e già li spazi eran diserti di stelle.

E con fervore inesausto continuo il mio volo verso il regno del Nulla: volo innanzi coraggiosamente, come su l'ali della luce: e i cieli mi passano d'innanzi con bigiori di nebbie.

Sistemi di mondi, fiumane come torrenti, si aggirano in vortici dietro il viandante del Sole.

Sul sentiero solitario si affretta verso di me un pellegrino.

— Sosta, camminante. Che cosa cerchi qui?

— Su le spiagge del Mondo è il mio sentiero. Navigo dove non v'è soffio di vento, dove si innalza la pietra miliare della creazione.

— Sosta: tu cammini in vano innanzi all'infinito!
— Anche tu, cammini in vano; anche dietro di me v'è l'Infinito.
Deponi i pensieri d'aquila e infrangiti l'ali. Fantasia, ardita viatrice, gitta qui l'àncora senza speranze.

Il Tutto come Infinito, trova già nel «Giardino» di Epicuro (341-270 av. C.) una dotta dissertazione; ma tale pensiero è divenuto patrimonio dell'umanità colta soltanto da breve tempo.

Quando guardiamo il cielo stellato la nostra fantasia corre e spazia con speciale predilezione nelle lontananze senza confine; infinito ci appare lo spazio, infinito il numero dei soli. Ma né pure innanzi a tal pensiero sosta la Teoria di Relatività. Lo trasforma e ricorda al nostro spirito indagatore che i suoi risultati non sono perfetti.

Più innanzi abbiamo rilevato come fra tutte le superficie il piano occupi un posto speciale; infatti è il solo CONTINUO bi-dimensionale la cui esistenza sia possibile in un mondo pur esso bi-dimensionale. Tutte le altre superficie si estendono nella terza dimensione e presuppongono, quindi, la esistenza di un mondo tri-dimensionale. Cioè: tutte le superficie, tranne il piano sono curve.

Noi siamo abituati, sin dall'inizio dei nostri studi, a concepire il piano *illimitato* ed *infinito*. Imaginiamoci, ora, degli esseri pensanti che abbiano una costituzione la cui figura sia piana, a mo' di superficie, che siano, cioè, bi-dimensionali, in modo che non possano riescire a rappre-

sentarsi la terza dimensione. Se essi vivono sur un *piano* indubbiamente considereranno questo loro mondo come illimitato ed infinito ed i loro matematici svilupperanno una Geometria del tutto simile alla euclidea.

Consideriamo la superficie di una gigantesca palla: pur essa potrebbe essere abitata da esseri bi-dimensionali che, rispetto alla grandezza del mondo, cioè alla superficie della palla, sono infinitamente piccoli, per modo che a nessuno di essi riesce possibile un « viaggio intorno al Mondo ». È ovvio come tali esseri nulla sappiano della curvatura del mondo « superficiale », perchè detta curvatura presuppone acquisito necessariamente il concetto della terza dimensione, concetto che i nostri esseri non posseggono affatto.

I nostri esseri bi-dimensionali e nella loro vita e nella loro struttura, hanno un patrimonio spirituale concettivo, anch'esso bi-dimensionale. Per essi lo spazio tri-dimensionale è sconosciuto, è inconcepibile. Se per ciò la loro filosofia, le loro concezioni scientifico-naturali, li mettessero nelle condizioni di dovere esprimere il loro concetto sulla grandezza del loro mondo, essi direbbero che tale mondo è illimitato ed infinito, precisamente come se vivessero sopra una superficie piana. Noi naturalmente rideremmo della loro ingenuità! In vero, nessun dubbio su la illimitatezza del loro mondo, poi che su la palla completamente chiusa in sè in vano cercheremmo e il principio e la fine. Ma questa illimitatezza è ben lontana dall'esprimere il concetto di infinito. Né pure la superficie di una palla

insolitamente grande può definirsi come infinitamente grande.

Da tale considerazione appare come: *illimitato* ed *infinito* non siano in tutti i casi indispensabilmente legati, espressioni di uno stesso concetto. Ma potremmo convincere gli abitanti della palla su la verità di quanto abbiamo detto?

Se uno di essi annunciasse un giorno che il mondo in cui vivono è sì illimitato ma non infinito, i suoi ascoltatori lo considererebbero come un allegro pazzo.

Torniamo ora dal mondo « superficiale » a quello della nostra realtà, al mondo, cioè, dello spazio tri-dimensionale, illimitato, che abbiamo sempre pensato di grandezza infinita, lasciandoci guidare da una vana illusione. Il nostro spazio, per quanto illimitato non è infinito: queste non sono parole inutili o folli; ma anche in ciò lasciamoci guidare dall'Einstein.

Lo spazio curvo. — Il mondo del divenire fisico nel quale viviamo, secondo il Minkowski deve essere considerato come un CONTINUO tetra-dimensionale, nel quale esiste non il Tempo preso a sè, nè lo Spazio preso a sè, si bene una unione intima, autonoma, Spazio-Tempo, e i rapporti che passano tra lo spazio tri-dimensionale e il MONDO tetra-dimensionale sono gli stessi che passano tra le superficie bi-dimensionali e lo spazio tri-dimensionale. Come nello spazio tri-dimensionale possiamo imaginare un numero — grande quanto

vogliamo — di svariatissime superficie, così nel MONDO possiamo imaginare l'esistenza di un numero illimitato di spazi tri-dimensionali delle più svariate forme.

Abbiamo visto in questo stesso capitolo che il carattere distintivo delle superficie ci è dato dalla possibilità che in essi esista o no una data curva. Le superficie curve si distinguono dal piano — è bene ripeterlo, per quanto sembri ovvio: il piano è l'unica superficie, non curva, caratteristica — per la condizione che esse, quali CONTINUI bi-dimensionali, possono svolgersi solamente in un CONTINUO tri-dimensionale.

Da ciò possiamo trarre le forze di pensiero per fare un passo innanzi nel campo delle nostre conoscenze, per giungere cioè al concetto di *spazio curvo*, un CONTINUO tri-dimensionale la cui esistenza è condizionata all'esistenza di una quarta dimensione.

Sarebbe folle il tentativo di rappresentare tale spazio in forma percettibile ai nostri sensi.

La *curvatura dello spazio* è un concetto riservato al dominio del pensiero, a cui si è giunti con un processo logico che ha, come punti di partenza, i rapporti, perfettamente comprensibili, intercorrenti tra le superficie in un CONTINUO tri-dimensionale e gli spazi in un CONTINUO tetra-dimensionale.

È opportuno avvertire subito che uno spazio curvo non ha nulla in comune, ad esempio, con una sfera. Una sfera è una porzione limitata dello

spazio, racchiusa in una *superficie curva; ma ciò non vuol dire che lo spazio sia curvo*. Il pensare altrimenti sarebbe come volessimo definire quale *superficie curva* un cerchio tracciato sur una superficie piana, soltanto perchè il suo contorno è curvo. Il *circolo* è una *superficie piana*, ma limitata da una linea *curva* che non modifica affatto la natura, diremo così, piana del piano.

Solo se tracciamo il circolo su la superficie di una sfera — pensiamo ai meridiani dei nostri mappamondi — questo cerchio comprende una superficie curva.

Ciò detto, vediamo se lo spazio tri-dimensionale delle nostre originarie concezioni sia o no *curvo*, questione questa alla quale si allaccia l'altra, non meno importante: se possiamo, cioè, attribuire allo spazio illimitato delle nostre attuali concezioni il carattere di *infinito*. Il porci tale questione appare giustificata quando pensiamo che talune curve non hanno una grandezza infinita.

Come potremo risolvere chiaramente la nostra nuova questione, se lo spazio del nostro mondo tri-dimensionale incanalandosi nel MONDO assume la quarta dimensione? Abbiamo detto che i matematici di un mondo bi-dimensionale giungerebbero ad una Geometria euclidea, se il loro mondo fosse un piano. Ma quali relazioni ricaverebbero essi se posti su la superficie di una sfera?

Essi designerebbero quale linea congiungente due punti della superficie della sfera, secondo la più breve distanza, quella che noi nella nostra

concezione tri-dimensionale chiamiamo un arco di cerchio. Ne segue che essi, in generale, potrebbero congiungere due punti del loro mondo provvisorio (la sfera) con la sola più breve congiungente, il che, però, non vale per noi quando i punti siano diametralmente opposti su la superficie della sfera. In tal caso si avrebbe non una sola, ma un numero illimitato di « più brevi congiungenti » come, ad esempio, l'innumere serie di meridiani passanti per i due poli. Ora ciò contraddice il primo principio di Euclide.

Da ciò si vede come la Geometria euclidea non possa valere per la superficie della sfera e come sia necessario, per i matematici bi-dimensionali, l'adozione di una Geometria non euclidea. Con esperienze rigorosamente scientifiche si è dimostrato che, del resto, in generale, la curvatura di una superficie trae con sè l'ammissione della inapplicabilità della Geometria euclidea.

Per ciò se incontriamo una superficie nella quale non siano applicabili, in tutto od in parte, i principî della Geometria euclidea, possiamo dedurre senz'altro che la superficie è curva. Lo scienziato del mondo bi-dimensiobale annunziando — come abbiamo detto — il suo mondo come *finito* avrebbe affermata una cosa giusta soltanto quando avesse constatata la inapplicabilità della Geometria non-euclidea per il suo mondo e quindi avesse dedotta la curvatura del suo mondo nella terza dimensione.

Siamo a buon punto per giungere ad estendere le nostre considerazioni dal CONTINUO bi-dimensionale al CONTINUO tri-dimensionale.

I risultati della Teoria di Relatività generale ci conducono a ritenere inoppugnabilmente che la Geometria euclidea non può valere per il nostro spazio.

Per ciò dobbiamo definire il nostro spazio curvo e, come l'Einstein dimostra, la cui natura è tale che dobbiamo considerarlo di grandezza finita.

La struttura geometrica del MONDO e, quindi, anche quella dello spazio tri-dimensionale della nostra consueta concezione, dipende dalle masse distribuite nell'Universo, poi che la struttura stessa è condizionata dai campi di gravitazione.

La diversità nella struttura geometrica trae con sè la validità di diverse geometrie non-euclidee e dalla specie di ciascuna di esse dipende, naturalmente, la specie della corrispondente *curva spaziale*. Questa sarà ovunque diversa, non solo per effetto della ineguale distribuzione delle masse ma anche, in genere, nel corso del tempo, poi che soli, pianeti, mondi, comete e le altre masse dell'Universo si muovono continuamente e, per ciò, determinano un continuo mutamento della struttura geometrica dello spazio.

La complicazione che deriva da tutto ciò è per noi quasi inconcepibile, imperocchè siamo stati abituati alla indipendenza dei concetti di spazio e di tempo. Ma la Fisica moderna si rivolge ora per le sue trattazioni allo SPAZIO-TEMPO, al CONTINUO tetra-dimensionale, instaurando un metodo che offre immensi vantaggi.

Conclusione. — Siamo giunti, così, al termine della nostra via: il quadro della teoria di Relatività ci sta innanzi, almeno nelle sue linee generali; il quadro del « mondo perduto » logoro dal Tempo tende a mano a mano a scomparire e scomparirà.

La nuova teoria giunse, per citare ancora una volta il Weyl come «una furiosa onda rivoluzionaria contro i nostri consueti concetti di Spazio, Tempo e Materia, considerati come solide basi della scienza naturale, per instaurare una più libera e più alta concezione delle cose. Oggi lo sviluppo delle indagini, per quanto riguarda le idee fondamentali, sembra ci possa permettere qualche conclusione; tuttavia, ci si trovi o no d'innanzi a qualcosa di definitivo, è necessario accostarsi al nuovo. Tornare indietro non è possibile: lo sviluppo del pensiero scientifico potrà oltre passare quanto si è raggiunto: il ritorno al rigido duro schema antico deve essere senz'altro escluso ».

INDICE DEI NOMI

Arago, 74
Archimede, 48, 136
Aristotile, 9
Battelli, 71
Becquerel, 120
Benedetti, 26
Biot, 73
Brace 92
Buisson, 163
Calderoni, 27
Cardani, 71
Cardano, 50
Cartesio, 35, 46
Cavendish, 6
Contu, 178
Copernico, 2
Crommelin, 165
Dalton, 10
Dayton, 83
De Brahe, 3, 8
De Cyon, 141, 142
Democrito, 13, 14, 42
De Toledo, 141, 142
Einstein, 66, 69, 95, 98, 110-115, 119, 121-123, 146, 149, 153, 154, 157-159, 162-171, 182, 186
Eisenhart, 178
Empedocle, 9
Epicuro, 180
Eraclito, 177
Euclide, 133, 135, 136, 185
Eulero, 73, 81
Fabre 178
Fabry, 163
Faraday, 74
Fenolli, 135
Fitzgérald, 95
Fizeau, 74, 83
Foucault, 50, 53, 66, 74
Fresnel, 73
Galilei, 25, 26, 33, 49, 93, 151
Gauss, 136-138, 158-161
Grimaldi, 73
Haas, 177
Helmholtz, 177
Hertz, 74
Hilbert, 136
Huyghens, 36, 73
Keplero, 3, 5, 12, 140, 162
Laul, 165
Lavoisier, 9, 175
Lenard 166 167,
Leonardo, 26, 35
Leverrier, 162
Liais, 73
Lie, 136
Lobacewschi, 135, 136

Lorentz, 92-96, 120
Mariani, 2
Mayer-Giua, 9
Mayer, 177
Maxwell, 74
Michelson, 83, 91-100, 111, 147, 169, 174
Miller, 183
Minkowski, 142-146, 159-182
Morley, 83, 91-100, 111, 147, 169, 174
Murani, 6, 71
Newton, 5, 15, 21, 33, 34, 35, 73, 151, 162, 174
Noble, 92
Nordmann, 120
Pitoni, 3, 53
Plana, 73
Poincaré, 8, 30, 31, 134, 139, 140
Rayleigh, 92
Rankine, 92
Riemann, 135, 136, 141,
Righi, 74, 83
Saccheri, 135
Sommerfeld, 12, 172
Spinoza, 20
Stormer, 73
Talete, 9
Trouton, 92
Vailati, 27
Veronese, 136
Young, 73
Weyl, 95, 123-187

122804